Set Domande

METODI E TECNOLOGIE DI SIMULAZIONE

INGEGNERIA INFORMATICA E DELL'AUTOMAZIONE

Docente: *Ricciardi Celsi Lorenzo*

Indice

Indice Lezioni ..... p. 2
Lezione 001 ..... p. 5
Lezione 002 ..... p. 6
Lezione 003 ..... p. 7
Lezione 004 ..... p. 8
Lezione 005 ..... p. 9
Lezione 006 ..... p. 10
Lezione 007 ..... p. 11
Lezione 008 ..... p. 12
Lezione 009 ..... p. 13
Lezione 010 ..... p. 14
Lezione 011 ..... p. 15
Lezione 012 ..... p. 16
Lezione 013 ..... p. 17
Lezione 014 ..... p. 18
Lezione 015 ..... p. 19
Lezione 016 ..... p. 20
Lezione 017 ..... p. 21
Lezione 018 ..... p. 23
Lezione 019 ..... p. 25
Lezione 020 ..... p. 26
Lezione 021 ..... p. 27
Lezione 022 ..... p. 28
Lezione 023 ..... p. 29
Lezione 024 ..... p. 30
Lezione 025 ..... p. 32
Lezione 026 ..... p. 33
Lezione 027 ..... p. 34
Lezione 028 ..... p. 35
Lezione 029 ..... p. 36
Lezione 030 ..... p. 37
Lezione 031 ..... p. 38
Lezione 032 ..... p. 39
Lezione 033 ..... p. 40
Lezione 034 ..... p. 41
Lezione 035 ..... p. 43
Lezione 036 ..... p. 44

Lezione 037 ..... p. 45
Lezione 038 ..... p. 47
Lezione 039 ..... p. 49
Lezione 040 ..... p. 51
Lezione 041 ..... p. 53
Lezione 042 ..... p. 54
Lezione 043 ..... p. 55
Lezione 044 ..... p. 56
Lezione 045 ..... p. 57
Lezione 046 ..... p. 59
Lezione 047 ..... p. 61
Lezione 048 ..... p. 62
Lezione 049 ..... p. 63
Lezione 050 ..... p. 64
Lezione 052 ..... p. 65
Lezione 053 ..... p. 66
Lezione 054 ..... p. 67
Lezione 055 ..... p. 68
Lezione 056 ..... p. 69
Lezione 057 ..... p. 70
Lezione 058 ..... p. 71
Lezione 059 ..... p. 72
Lezione 061 ..... p. 73
Lezione 062 ..... p. 74
Lezione 063 ..... p. 75
Lezione 064 ..... p. 76
Lezione 065 ..... p. 77
Lezione 066 ..... p. 78
Lezione 067 ..... p. 79
Lezione 068 ..... p. 80
Lezione 069 ..... p. 81
Lezione 070 ..... p. 82
Lezione 072 ..... p. 83
Lezione 073 ..... p. 84
Lezione 074 ..... p. 85
Lezione 075 ..... p. 86
Lezione 078 ..... p. 87
Lezione 079 ..... p. 88
Lezione 080 ..... p. 89
Lezione 081 ..... p. 90

Lezione 082 ..... p. 91
Lezione 083 ..... p. 92
Lezione 084 ..... p. 93
Lezione 085 ..... p. 94
Lezione 086 ..... p. 95
Lezione 087 ..... p. 96
Lezione 088 ..... p. 98
Lezione 089 ..... p. 99
Lezione 090 ..... p. 101
Lezione 091 ..... p. 102
Lezione 092 ..... p. 103
Lezione 093 ..... p. 105
Lezione 094 ..... p. 106
Lezione 095 ..... p. 108

Lezione 001

01. **Quali sono gli obiettivi del corso di Metodi e Tecnologie di Simulazione?**

■ Illustrare allo studente il problema della modellizzazione di sistemi reali e fornirgli un insieme di metodi per l'analisi e il controllo di sistemi dinamici in ambiente simulato.

☐ Analizzare i diversi tipi di modelli matematici esistenti per i sistemi di controllo.

☐ Fornire tecniche avanzate di analisi matematica e modellistica multifisica.

☐ Nessuna delle altre risposte proposte è corretta

Lezione 002

01. In cosa consiste l'azione di controllo?

■ Consiste (i) nella individuazione, per le grandezze controllanti, delle evoluzioni temporali alle quali corrisponde l'andamento desiderato per le grandezze controllate e (ii) nell'attuazione concreta delle operazioni che consentono di realizzare questi andamenti nel processo reale.

☐ Consiste in un intervento del progettista finalizzato a rilevare eventuali anomalie di funzionamento.

☐ Nessuna delle altre risposte proposte è corretta

☐ Consiste nella misura delle uscite e nella conseguente regolazione del comportamento del sistema.

02. Si descrivano brevemente il problema del controllo e i suoi elementi fondamentali.

Per controllo si intende l'azione o l'insieme delle azioni indirizzate a far assumere ad una o più grandezze, in generale grandezze fisiche, un valore determinato o una successione determinata di valori nel tempo.
Gli elementi fondamentali del problema sono:
• Il *processo controllato* o *processo*, visto come sistema astratto orientato
• Le *grandezze controllate*, ovvero le variabili del processo di cui interessa osservare e controllare le evoluzioni
• Le *grandezze controllanti*, ovvero le variabili del processo manipolando le quali sia possibile ottenere lo scopo desiderato
• Il *controllore*, visto come sistema astratto orientato.

Lezione 003

01. Qual è la differenza tra modelli deterministici e modelli stocastici?

☐ I primi rappresentano anche sistemi deterministici di cui non si abbia conoscenza completa.

☐ I primi, a differenza dei secondi, modellano sistemi intrinsecamente probabilistici oppure sistemi deterministici di cui non si abbia conoscenza completa.

■ I secondi, a differenza dei primi, modellano sistemi intrinsecamente probabilistici oppure sistemi deterministici di cui non si abbia conoscenza completa.

☐ Nessuna delle altre risposte proposte è corretta

02. Si illustrino le principali modalità di classificazione dei modelli di sistemi dinamici.

• Modelli dinamici a costanti concentrate
Sono caratterizzati da equazioni differenziali o sistemi di equazioni differenziali alle derivate temporali. Sono utilizzati quando il modellista è interessato a fenomeni che avvengono su una scala di tempi comparabile alle costanti di tempo del sistema e si può assumere che la propagazione dei segnali nel sistema sia istantanea.
• Modelli dinamici a costanti distribuite
Sono caratterizzati da equazioni differenziali o sistemi di equazioni differenziali alle derivate parziali. Sono utilizzati quando il modellista è interessato a fenomeni che avvengono su una scala di tempi comparabile alle costanti di tempo del sistema e le dimensioni del sistema sono comparabili o maggiori alle lunghezze d'onda dei segnali.

Lezione 004

01. Quando un modello lineare è adatto a fornire un'approssimazione locale del comportamento di un sistema fisico intrinsecamente nonlineare?

☐ Nessuna delle altre risposte proposte è corretta

☐ Mai.

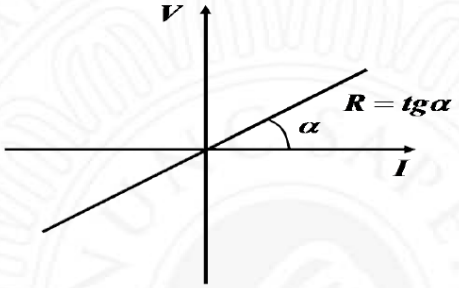
■ Quando le variabili dinamiche in gioco hanno una variabilità piccola, tale da non portare lo stato del sistema fuori da un opportuno intorno del punto di lavoro scelto.

☐ Solo per determinati sistemi dinamici.

02. Si discutano brevemente, eventualmente con l'ausilio di un esempio, i limiti di validità dei modelli lineari.

Si vuole ora mostrare che i modelli lineari hanno un limite di validità anche quando vengono utilizzati per descrivere sistemi fisici che si ritengono essere intrinsecamente lineari.

Si consideri ad esempio una porzione di cavo conduttore di lunghezza l e sezione S, cui è applicata una tensione V.



La relazione che intercorre tra la tensione applicata e la corrente I che attrraversa il conduttore è data dalla ben nota legge di Ohm

$$V = RI$$

In quali condizioni è lecito assumere che R sia una costante, e che sussista dunque una relazione di tipo lineare tra tensione e corrente?

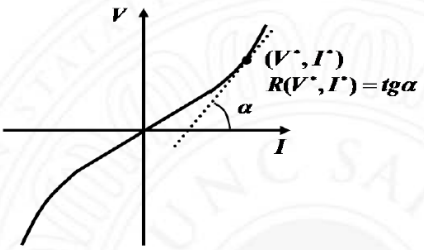
La resistenza di un conduttore è definita dalla relazione

$$R = \rho \frac{l}{S}$$

dove ρ rappresenta la resistività, per la quale sussiste la relazione

$$\rho = \rho_0(1 + \alpha\Delta T)$$

ρ_0: resistività intrinseca del materiale; α: costante; ΔT: temperatura espressa in gradi Celsius



La temperatura del conduttore dipende, per effetto Joule, dall'ampiezza della corrente che lo attraversa, ovvero si ha $\Delta T \equiv \Delta T(I)$

Se ne conclude quindi che la resistenza dipende dall'ampiezza della corrente che lo attraversa. Per correnti sufficientemente elevate la relazione tra tensione e corrente non può essere assunta lineare, ma si ha

$$V = R(I)I$$

Lezione 005

01. Ogni combinazione lineare del tipo y_0(t)=c_1*exp(lambda_1*t)+c_2*exp(lambda_2*t) + ... + c_n*exp(lambda_n*t) è soluzione dell'equazioneomogenea associata ad una equazione differenziale ordinaria. Cosa rappresentano i coefficienti lambda_i, per i=1,..., n?

- [ ] Gli autovalori della matrice dinamica del sistema.
- [ ] Le condizioni iniziali del problema di Cauchy.
- [x] Le radici del polinomio caratteristico associato all'equazione differenziale considerata.
- [ ] Le soluzioni del problema di Cauchy.

02. Come si scrive la soluzione o integrale generale di un'equazione differenziale ordinaria?

- [x] Come somma della soluzione dell'equazione omogenea associata e del cosiddetto integrale particolare.
- [ ] Nessuna delle altre risposte proposte è corretta
- [ ] Come la sola soluzione dell'equazione omogenea associata.
- [ ] Come il solo integrale particolare.

03. Definire la soluzione (o integrale generale) di un'equazione differenziale ordinaria e la procedura di calcolo della soluzione dell'equazione omogenea associata.

La soluzione o *integrale generale* dell'equazione

$$\sum_{k=0}^{n} a_k \frac{d^k y(t)}{dt^k} = u(t)$$

può essere sempre scritta nella forma

$$y(t) = y^0(t) + y^*(t)$$

dove $y^0(t)$ è la soluzione dell'equazione *omogenea associata*

$$\sum_{k=0}^{n} a_k \frac{d^k y(t)}{dt^k} = 0$$

mentre $y^*(t)$ è il cosiddetto *integrale particolare*.

La soluzione dell'equazione omogenea può essere determinata per prove.
Proviamo a sostituire $y(t) = e^{\lambda t}$ nell'equazione

$$\sum_{k=1}^{n} a_k \frac{d^k y(t)}{dt^k} = 0$$

Si ottiene

$$\left(\sum_{k=1}^{n} a_k \lambda^k \right) e^{\lambda t} = 0$$

che è vera per qualunque tempo a patto che

$$D(\lambda) = \sum_{k=1}^{n} a_k \lambda^k = a_n \lambda^n + a_{n-1} \lambda^{n-1} + \ldots + a_0 = 0$$

Il polinomio $D(\lambda)$ è detto *polinomio caratteristico* associato all'equazione differenziale considerata.

Le radici $\lambda_1,\ldots,\lambda_n$ del polinomio $D(\lambda)$ definiscono un set di n soluzioni dell'equazione omogenea associata

$$e^{\lambda_1 t}, e^{\lambda_2 t}, \ldots, e^{\lambda_n t}$$

(ci limitiamo per semplicità al caso di radici a molteplicità algebrica unitaria)
Notiamo ora che l'operatore differenziale

$$S = \sum_{k=1}^{n} a_k \frac{d^k}{dt^k}$$

è un operatore lineare per cui ogni combinazione lineare del tipo

$$y^0(t) = c_1 e^{\lambda_1 t} + c_2 e^{\lambda_2 t} + \ldots + c_n e^{\lambda_n t}$$

è soluzione. Le n costanti $c_1, c_2, \ldots, c_n$ vengono determinate, come vedremo in seguito, in base alle n condizioni iniziali del *problema di Cauchy*.

Lezione 006

01. Illustrare la procedura di determinazione di un integrale particolare di un'equazione differenziale ordinaria nel caso di ingresso polinomiale.

Nel caso in cui il termine noto assuma la forma

$$u(t) = \sum_{h=0}^{N} A_h t^h$$

si può cercare la soluzione particolare nella forma

$$y^*(t) = \sum_{h=0}^{N} B_h t^h$$

Sostituendo la soluzione candidata nell'equazione di partenza si ottiene

$$\sum_{h=0}^{N} C_h(B_1,...,B_N) t^h = \sum_{h=0}^{N} A_h t^h$$

Per il principio di identità dei polinomi si deve avere

$$C_h(B_1,...,B_N) = A_h \qquad \forall h = 0,...,N$$

Si ottiene un sistema lineare non omogeneo di $N+1$ equazioni nelle $N+1$ incognite B_h.

02. Illustrare la procedura di determinazione di un integrale particolare di un'equazione differenziale ordinaria nel caso di ingresso sinusoidale.

Nel caso in cui il termine noto assuma la forma

$$u(t) = U_0 \sin \omega t$$

si può cercare la soluzione particolare nella forma

$$y^*(t) = A \sin \omega t + B \cos \omega t$$

Sostituendo la soluzione candidata nell'equazione di partenza si ottiene

$$C(A,B) \sin \omega t + D(A,B) \cos \omega t = U_0 \sin \omega t$$

Per il principio di identità dei polinomi si deve avere

$$\begin{cases} C(A,B) = U_0 \\ D(A,B) = 0 \end{cases}$$

Si ottiene un sistema lineare non omogeneo di 2 equazioni nelle 2 incognite A e B.

Lezione 007

01. La soluzione di una equazione differenziale omogenea di ordine n è definita a meno di n costanti di integrazione. In base al problema di Cauchy, per determinare univocamente l'integrale generale di una equazione differenziale non omogenea di ordine n, che cosa è quindi necessario associare ad essa?

- [x] n condizioni iniziali.
- [ ] n vincoli di disuguaglianza.
- [ ] n derivate costanti.
- [ ] n termini noti.

02. Si illustri brevemente la procedura di soluzione di un'equazione differenziale nel dominio di Laplace.

Riconsideriamo il problema nel dominio di Laplace. Si consideri nuovamente l'equazione

$$\sum_{k=0}^{n} a_k \frac{d^k y(t)}{dt^k} = \sum_{h=0}^{m} b_h \frac{d^h u(t)}{dt^h}$$

Indicheremo con lettere maiuscole le trasformate di Laplace delle variabili espresse nel dominio del tempo

$$F(s) = \int_0^{\infty} f(t) e^{-st} dt$$

Ricordiamo dapprima la proprietà che lega la trasformata di Laplace di una generica funzione $f(t)$ e la trasformata delle sue derivate rispetto al tempo.

$$L\left[\frac{df(t)}{dt}\right] = sF(s) - f(0)$$

$$L\left[\frac{d^2 f(t)}{dt^2}\right] = s^2 F(s) - sf(0) - \left.\frac{df(t)}{dt}\right|_{t=0}$$

Per iterazione

$$L\left[\frac{d^k f(t)}{dt^k}\right] = s^k F(s) - \sum_{i=0}^{k-1} s^i \left.\frac{d^{k-1-i} f(t)}{dt^{k-1-i}}\right|_{t=0}$$

Trasformando entrambi i membri dell'equazione differenziale secondo Laplace, ricordando la proprietà di linearità della trasformata ed esplicitando rispetto a $y(s)$ si ottiene

$$Y(s) = \frac{\sum_{h=0}^{m} b_h s^h}{\sum_{k=0}^{n} a_k s^k} U(s) + \frac{\sum_{k=0}^{n} a_k \sum_{i=0}^{k-1} s^i \left.\frac{d^{k-1-i} y(t)}{dt^{k-1-i}}\right|_{t=0}}{\sum_{k=0}^{n} a_k s^k} - \frac{\sum_{h=0}^{m} b_h \sum_{j=0}^{h-1} s^j \left.\frac{d^{h-1-j} u(t)}{dt^{h-1-j}}\right|_{t=0}}{\sum_{k=0}^{n} a_k s^k}$$

Si noti che il denominatore di $Y(s)$ coincide con il polinomio caratteristico.

Per comprendere meglio il risultato di questa formula riduciamoci al caso in cui

$$u(0) = \left.\frac{du(t)}{dt}\right|_{t=0} = \left.\frac{d^{m-1} u(t)}{dt^{m-1}}\right|_{t=0} = 0$$

Questa ipotesi non è da considerarsi restrittiva al fine della comprensione delle caratteristiche della soluzione $y(t)$.

Con l'ipotesi precedente l'integrale generale nel dominio di Laplace assume la forma

$$Y(s) = \underbrace{\frac{\sum_{h=0}^{m} b_h s^h}{\sum_{k=0}^{n} a_k s^k} U(s)}_{\text{Risposta Forzata}} + \underbrace{\frac{\sum_{k=0}^{n} a_k \sum_{i=0}^{k-1} s^i \left.\frac{d^{k-1-i} y(t)}{dt^{k-1-i}}\right|_{t=0}}{\sum_{k=0}^{n} a_k s^k}}_{\text{Evoluzione Libera}}$$

Risulta inoltre definita la *funzione di trasferimento*, come il rapporto tra la soluzione ed il termine noto, da vedersi rispettivamente come uscita e ingresso del sistema associato all'equazione di partenza, in corrispondenza a condizioni iniziali nulle.

$$W(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{\sum_{h=1}^{m} b_h s^h}{\sum_{k=1}^{n} a_k s^k}$$

Esaminiamo ora separatamente la risposta libera

$$Y_L(s) = \frac{\sum_{k=0}^{n} a_k \sum_{i=0}^{k-1} s^i \left.\frac{d^{k-1-i} y(t)}{dt^{k-1-i}}\right|_{t=0}}{\sum_{k=0}^{n} a_k s^k}$$

Limitandoci al caso in cui le radici del polinomio caratteristico hanno molteplicità unitaria, sviluppando in frazioni parziali si ha

$$Y_L(s) = \sum_{i=1}^{n} \frac{R_i}{s - \lambda_i} \qquad R_i = Y_L(s)(s - \lambda_i)\Big|_{s=\lambda_i}$$

Antitrasformando secondo Laplace si ottiene l'evoluzione libera nel dominio del tempo, ovvero la soluzione dell'equazione differenziale omogenea associata.

$$y_L(t) = \sum_{i=1}^{n} R_i e^{\lambda_i t}$$

Abbiamo così trovato un importante risultato: l'evoluzione libera è una combinazione lineare di esponenziali del tipo $e^{\lambda_i t}$ secondo dei coefficienti che dipendono dalle condizioni iniziali.

Esaminiamo ora la risposta forzata

$$Y_F(s) = \frac{\sum_{h=0}^{m} b_h s^h}{\sum_{k=0}^{n} a_k s^k} U(s)$$

Limitandoci al caso in cui le radici del polinomio caratteristico hanno molteplicità unitaria, sviluppando in frazioni parziali si ha

$$Y_F(s) = \sum_{i=1}^{n} \frac{R_i}{s - \lambda_i} + \sum_{j=1}^{p} \frac{R_j}{s - \mu_j} \qquad \begin{aligned} R_i &= Y_F(s)(s - \lambda_i)\Big|_{s=\lambda_i} \\ R_j &= Y_F(s)(s - \mu_j)\Big|_{s=\mu_j} \end{aligned}$$

dove μ_j sono i poli introdotti in $Y_F(s)$ dal termine noto $U(s)$.

Antitrasformando secondo Laplace si ha

$$y_F(t) = \sum_{i=1}^{n} R_i e^{\lambda_i t} + \sum_{j=1}^{p} R_j e^{\mu_j t}$$

Lezione 008

01. Data la rappresentazione con lo spazio di stato di un sistema, posta nella forma esplicita, cosa rappresenta la phi(t) = exp(At)?

- [ ] La matrice delle risposte impulsive.
- [x] La matrice di transizione dello stato in sé stesso.
- [ ] La matrice delle risposte impulsive nello stato.
- [ ] La matrice di transizione dello stato nell'uscita.

02. L'antitrasformata della funzione di trasferimento W(s) di un sistema rappresenta:

- [ ] La risposta forzata del sistema nel dominio del tempo.
- [ ] La risposta al gradino del sistema nel dominio del tempo.
- [ ] La risposta libera del sistema nel dominio del tempo.
- [x] La risposta all'impulso del sistema nel dominio del tempo.

03. L'antitrasformata di W(s)U(s) consente:

- [ ] Il calcolo della risposta forzata del sistema nel dominio del tempo solo in corrispondenza a determinati ingressi.
- [x] Il calcolo della risposta forzata del sistema nel dominio del tempo in corrispondenza a qualunque ingresso.
- [ ] Il calcolo della risposta a gradino del sistema.
- [ ] Il calcolo della risposta libera del sistema nel dominio del tempo in corrispondenza a qualunque ingresso.

04. Data una rappresentazione con lo spazio di stato nella forma xdot=Ax+Bu, y=Cx, se x ha dimensione n, u ha dimensione q e y ha dimensione p, che dimensioni ha la matrice B?

- [ ] p x q
- [ ] n x n
- [ ] p x n
- [x] n x q

05. Definire, mediante le relative formule, la matrice di transizione dello stato nell'uscita e la matrice delle risposte impulsive.

$\psi(t) = Ce^{At}$ *Matrice di transizione dello stato nell'uscita*

$w(t) = Ce^{At}B + D\delta(t)$ *Matrice delle risposte impulsive*

06. Si illustri brevemente la procedura di passaggio da un'equazione differenziale ad una rappresentazione con lo spazio di stato.

Riconsideriamo dunque l'equazione

$$\sum_{k=0}^{n} a_k \frac{d^k y(t)}{dt^k} = u(t)$$

Si introduce una prima variabile di stato ponendo $y=x_1$

$$\sum_{k=0}^{n} a_k \frac{d^k x_1(t)}{dt^k} = u(t)$$

Si evidenzia la derivata prima di x_1 e si introduce così una seconda variabile di stato

$$\left(\sum_{k=1}^{n} a_k \frac{d^{k-1}}{dt^{k-1}}\frac{dx_1(t)}{dt} + a_0 x_1(t) = u(t)\right) \wedge \left(x_2(t) = \frac{dx_1(t)}{dt}\right) \Rightarrow \sum_{k=1}^{n} a_k \frac{d^{k-1}x_2(t)}{dt^{k-1}} + a_0 x_1(t) = u(t)$$

Ripetendo la procedura si ottiene

$$\left(\sum_{k=2}^{n} a_k \frac{d^{k-2}}{dt^{k-2}}\frac{dx_2(t)}{dt} + a_1 x_2(t) + a_0 x_1(t) = u(t)\right) \wedge \left(x_1(t) = \frac{dx_2(t)}{dt}\right) \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \sum_{k=2}^{n} a_k \frac{d^{k-2}x_2(t)}{dt^{k-2}} + a_1 x_2(t) + a_0 x_1(t) = u(t)$$

Riassumendo si è ottenuta la rappresentazione

$$\begin{aligned} \dot{x}_1(t) &= x_2(t) \\ \dot{x}_2(t) &= x_3(t) \\ &\dots \\ \dot{x}_{n-1}(t) &= x_n(t) \\ \dot{x}_n(t) &= -\sum_{m=1}^{n} a_{m-1} x_m(t) + u(t) \end{aligned} \qquad y = x_1(t)$$

che è del tipo

$$\dot{x} = Ax + Bu$$
$$y = Cx$$

con

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 1 \\ -a_0 & -a_1 & -a_2 & \dots & -a_{n-2} & -a_{n-1} \end{pmatrix} \quad B = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \dots \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \quad C = (1 \;\; 0 \;\; 0 \;\; \dots \;\; 0 \;\; 0)$$

All'h-esima iterazione si ha

$$\left(\sum_{k=h}^{n} a_k \frac{d^{k-h}}{dt^{k-h}}\frac{dx_h(t)}{dt} + \sum_{m=1}^{h} a_{m-1} x_m(t) = u(t)\right) \wedge \left(x_{h+1}(t) = \frac{dx_h(t)}{dt}\right) \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \sum_{k=h}^{n} a_k \frac{d^{k-h}x_{h+1}(t)}{dt^{k-h}} + \sum_{m=1}^{h} a_{m-1} x_m(t) = u(t)$$

Si ripete la procedura fin quando $h=n-1$ ottenendo infine

$$\left(\sum_{k=n-1}^{n} a_k \frac{d^{k-(n-1)}}{dt^{k-(n-1)}}\frac{dx_{n-1}(t)}{dt} + \sum_{m=1}^{n-1} a_{m-1} x_m(t) = u(t)\right) \wedge \left(x_n(t) = \frac{dx_{n-1}(t)}{dt}\right) \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \frac{dx_n(t)}{dt} + \sum_{m=1}^{n} a_{m-1} x_m(t) = u(t)$$

dove si è posto nell'ultima equazione $a_n=1$ senza perdita di generalità, poichè è sempre possibile dividere l'equazione di partenza per a_n e ridefinire opportunamente coefficienti e termine noto.

07. Definire, mediante le relative formule, la matrice di transizione dello stato in sé stesso e la matrice delle risposte impulsive nello stato.

$\phi(t) = e^{At}$ *Matrice di transizione dello stato in se stesso*

$h(t) = e^{At}B$ *Matrice delle risposte impulsive nello stato*

© 2016 Università Telematica eCampus - Data Stampa 14/12/2016 15:06:20 - 12/108

Lezione 009

01. Cosa distingue l'oscillatore smorzato dall'oscillatore armonico semplice?

- [ ] Nessuna delle altre risposte proposte è corretta
- [ ] L'assenza di un termine di attrito.
- [ ] L'assenza della molla.
- [x] La presenza di un termine di attrito, che si oppone al moto, proporzionale alla velocità del corpo.

02. Quale delle seguenti affermazioni è corretta con riferimento alla soluzione dell'equazione dell'oscillatore armonico semplice?

- [ ] La soluzione è del tipo x(t) = c1*exp(i*omega0*t) + c2*exp(-i*omega0*t) ed è non periodica.
- [ ] La soluzione è del tipo x(t) = A*sin(omega0*t) + B*cos(omega0*t) ed è non periodica.
- [ ] Nessuna delle altre risposte proposte è corretta
- [x] La soluzione è del tipo x(t) = a*sin(omega0*t+phi) ed è periodica di periodo T=2*pi/omega0.

03. Cosa rappresenta l'oscillatore armonico semplice?

- [ ] Un pendolo invertito su un carrello che scivola lungo un piano inclinato.
- [x] Un corpo puntiforme di massa m vincolato a muoversi lungo una specifica direzione. Tale corpo è collegato ad un secondo corpo, che si suppone di massa infinita, attraverso una molla di costante elastica k, che si suppone lavorare in regime di linearità.
- [ ] Una sequenza di carrelli connessi da molle tra loro e con un corpo di massa infinita posizionato all'estremità.
- [ ] Nessuna delle altre risposte proposte è corretta

04. Come si determinano le costanti di integrazione relative alla soluzione dell'oscillatore armonico semplice?

- [ ] Si possono assegnare arbitrariamente.
- [ ] Nessuna delle altre risposte proposte è corretta
- [ ] Risolvendo il problema di Cauchy in base alle condizioni iniziali e valgono a = sqrt(A^2+B^2) e phi = 2*pi/omega0.
- [x] Risolvendo il problema di Cauchy in base alle condizioni iniziali e valgono a = sqrt(x0^2 + (x0dot/omega0)^2) e phi = arctg(x0*omega0/x0dot).

05. Con riferimento all'evoluzione libera dell'oscillatore smorzato, si possono distinguere tre casi:

- [ ] 1) alpha < omega0, regime oscillatorio o pseudoperiodico; 2) alpha = omega0, sovrasmorzamento; 3) alpha > omega0, smorzamento critico, con alpha = coeff_attrito/2m.
- [ ] Nessuna delle altre risposte proposte è corretta
- [x] 1) alpha < omega0, regime oscillatorio o pseudoperiodico; 2) alpha = omega0, smorzamento critico; 3) alpha > omega0, sovrasmorzamento, con alpha = coeff_attrito/2m.
- [ ] 1) alpha < omega0, sovrasmorzamento; 2) alpha = omega0, smorzamento critico; 3) alpha > omega0, regime oscillatorio o pseudoperiodico, con alpha = coeff_attrito/2m.

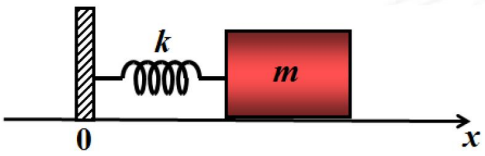
06. Come è definito il fattore di merito dell'oscillatore smorzato?

- [ ] Nessuna delle altre risposte proposte è corretta
- [x] E' il rapporto tra le ampiezze massime della forza elastica di richiamo e le ampiezze massime della forza d'attrito.
- [ ] E' il rapporto tra l'energia dissipata in un periodo e quella immagazzinata in un periodo.
- [ ] E' il rapporto tra le ampiezze massime della forza di attrito e le ampiezze massime della forza elastica di richiamo.

07. Descrivere brevemente il modello dell'oscillatore smorzato (non forzato).

In prima istanza il problema è quello di un corpo puntiforme di massa m vincolato a muoversi lungo una specifica direzione. Il corpo è collegato ad un secondo corpo, che supporremo di massa infinita, attraverso una molla di costante elastica k, che si suppone quindi lavorare in regime di linearità. La forza elastica di richiamo sarà quindi del tipo

$$F = -k(x)x \cong -kx$$



Il primo passo per la determinazione del modello è l'introduzione di un sistema di riferimento. Poiché il sistema ha un solo grado di libertà, ci basta una coordinata per individuare univocamente la posizione del corpo, la coordinata x lungo la direzione del moto. Poniamo l'origine del sistema di riferimento in corrispondenza alla configurazione di riposo della molla, ovvero quella corrispondente a forza di richiamo nulla,
Dalla legge di Newton si ha

$$m\ddot{x} = F \Rightarrow m\ddot{x} = -kx \Rightarrow m\ddot{x} + kx = 0$$

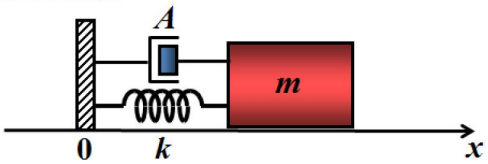
Dividendo per m e notando che k/m ha le dimensioni di una frequenza al quadrato, possiamo porre $\omega_0^2 = k/m$ e scrivere infine

$$\ddot{x} + \omega_0^2 x = 0$$

Equazione dell'oscillatore armonico semplice

08. Descrivere brevemente il modello dell'oscillatore armonico semplice.

Riconsideriamo il problema introducendo un termine di attrito, che si oppone al moto, proporzionale alla velocità del corpo



L'equazione del moto in tal caso diventa

$$m\ddot{x} = F \Rightarrow m\ddot{x} = -kx - A\dot{x} \Rightarrow m\ddot{x} + A\dot{x} + kx = 0$$

Anche in questo caso è utile dividere l'equazione per m e introdurre i seguenti parametri

$$\alpha = \frac{A}{2m} \qquad \omega_0^2 = \frac{k}{m}$$

Si ottiene infine

$$\ddot{x} + 2\alpha\dot{x} + \omega_0^2 x = 0$$

Equazione dell'oscillatore smorzato

Lezione 010

01. Quanto vale la potenza media trasferita all'oscillatore smorzato forzato sul periodo T?

- [ ] P_media = - (a*omega*f0)/2
- [ ] Nessuna delle altre risposte proposte è corretta
- [ ] P_media = - (a*omega*f0)*cos(omega*t)*sin(omega*t + phi)
- [x] P_media = - ((a*omega*f0)/2)*sin(phi)

02. Qual è l'equazione del moto di un oscillatore smorzato forzato?

- [ ] xdoubledot + omega0^2*x = 0
- [ ] Nessuna delle altre risposte proposte è corretta
- [ ] xdoubledot + 2*alpha*xdot + omega0^2*x = 0
- [x] xdoubledot + 2*alpha*xdot + omega0^2*x = f/m

03. Qualitativamente, qual è il comportamento di un oscillatore smorzato forzato in regime oscillatorio?

- [ ] Nessuna delle altre risposte proposte è corretta
- [ ] E' quello tipico di un filtro passa-banda del secondo ordine con poli complessi coniugati.
- [x] E' quello tipico di un filtro passa-basso del secondo ordine con poli complessi coniugati.
- [ ] E' quello tipico di un filtro passa-alto del secondo ordine con poli complessi coniugati.

04. Qual è la differenza in termini energetici tra oscillatore armonico semplice e oscillatore smorzato?

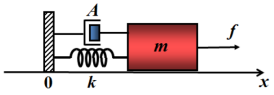
- [ ] Il secondo è un sistema conservativo, mentre nel primo l'energia non si conserva.
- [ ] Nessuna delle altre risposte proposte è corretta
- [x] Il primo è un sistema conservativo, mentre nel secondo l'energia non si conserva.
- [ ] Nessuna. Sono entrambi sistemi conservativi.

05. Qual è la situazione energetica dell'oscillatore armonico semplice quando la massa attraversa l'origine?

- [ ] Nessuna delle altre risposte proposte è corretta
- [ ] L'energia cinetica e l'energia potenziale sono uguali.
- [ ] L'energia cinetica è nulla e l'energia potenziale è massima.
- [x] L'energia cinetica è massima e l'energia potenziale è nulla.

06. Descrivere brevemente il modello dell'oscillatore smorzato forzato.

Esaminiamo adesso il comportamento dell'oscillatore smorzato in presenza di forzamento



L'equazione del moto in tal caso diventa

$$m\ddot{x}(t) + A\dot{x}(t) + kx(t) = f(t)$$

Introducendo la pulsazione naturale ω_0 e il coefficiente di attrito α l'equazione assume la forma definitiva

$$\ddot{x} + 2\alpha\dot{x} + \omega_0^2 x = \frac{f}{m}$$

Equazione dell'oscillatore smorzato forzato

Siamo ora interessati al calcolo dell'integrale particolare in corrispondenza a ingressi armonici. Ciò per mettere in evidenza le caratteristiche in frequenza del sistema. Analogamente a quanto fatto nella Lezione 4 imponiamo un forzamento armonico, questa volta nella forma complessa

$$\tilde{f}(t) = f_0 e^{i\omega t}$$

Poichè il modello è lineare la soluzione sarà del tipo

$$\tilde{x}(t) = \tilde{A} e^{i\omega t}$$

dove $\tilde{A}$ rappresenta un'ampiezza complessa, il cui significato sarà chiaro nel seguito. Sostituendo nell'equazione di partenza si ha

$$-\omega^2 \tilde{A} e^{i\omega t} + 2\alpha i\omega \tilde{A} e^{i\omega t} + \omega_0^2 \tilde{A} e^{i\omega t} = \frac{f_0}{m} e^{i\omega t}$$

da cui

$$\tilde{A} = \frac{f_0/m}{(\omega_0^2 - \omega^2) + i2\alpha\omega} \qquad \tilde{x}(t) = \frac{f_0/m}{(\omega_0^2 - \omega^2) + i2\alpha\omega} e^{i\omega t}$$

Si noti che $\tilde{A}/f_0$ altro non è che la risposta in frequenza del sistema. Tale risultato può infatti essere trovato trasformando l'equazione dell'oscillatore secondo Laplace, e calcolando la funzione di trasferimeto del sistema per $s=i\omega$.

$$\ddot{x}(t) + 2\alpha\dot{x}(t) + \omega_0^2 x(t) = \frac{f(t)}{m} \Rightarrow s^2 X(s) + 2\alpha s X(s) + \omega_0^2 X(s) = \frac{F(s)}{m} \Rightarrow$$

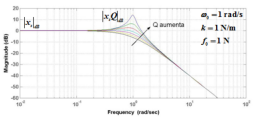
$$\Rightarrow W(s) = \frac{X(s)}{F(s)} = \frac{1/m}{s^2 + 2\alpha s + \omega_0^2} = \frac{1/k}{1 + \frac{2\xi}{\omega_0}s + \frac{s^2}{\omega_0^2}} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow W(i\omega) = \frac{1/m}{(\omega_0^2 - \omega^2) + i2\alpha\omega}$$

Questo semplice conto mette in evidenza il significato della risposta in frequenza: essa rappresenta il coefficiente (complesso) di proporzionalità tra ingresso e uscita, in corrispondenza ad un ingresso di tipo armonico.

Il comportamento del sistema (in regime oscillatorio) è quello tipico di un passabasso del second'ordine con poli complessi coniugati.
In particolare l'ampiezza della risposta vale

$$|A| = \frac{f_0/m}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\alpha^2\omega^2}}$$



Si ha:

$$\omega << \omega_0 \Rightarrow |\tilde{A}| \to \frac{f_0}{m\omega_0^2} = \frac{f_0}{k} = x_s$$

Comportamento statico

$$\omega = \omega_0 \Rightarrow |\tilde{A}| = \frac{f_0}{m2\alpha\omega_0} = \frac{f_0\omega_0}{m2\alpha\omega_0^2} = \frac{f_0}{k}\frac{\omega_0}{2\alpha} = x_s Q$$

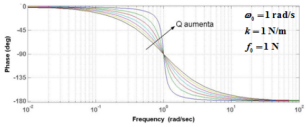
Il fattore di merito funziona da amplificatore dell'ampiezza statica (risonanza)

$$\omega >> \omega_0 \Rightarrow |\tilde{A}| \to 0$$

Si entra nel regime della massa e predominano gli effetti inerziali

Il sistema porta uno sfasamento tra forzante e spostamento pari a

$$\angle\tilde{A} = -arctg\left(\frac{2\alpha\omega}{\omega_0^2 - \omega^2}\right)$$



Si ha:

$$\omega << \omega_0 \Rightarrow \angle\tilde{A} \to 0$$

Comportamento statico: forzamento e spostamento sono in fase

$$\omega = \omega_0 \Rightarrow |\tilde{A}| = -\frac{\pi}{2}$$

Alla risonanza forzamento e spostamento sono in quadratura

$$\omega >> \omega_0 \Rightarrow |\tilde{A}| \to -\pi$$

Si entra nel regime della massa e predominano gli effetti inerziali: forzamento e spostamento sono in opposizione di fase

Lezione 011

01. Alla risoluzione di quale problema di controllo ben si presta il modello del pendolo inverso forzato?

[x] Il problema di controllo finalizzato a trovare il controllo tau in corrispondenza del quale, a regime, la configurazione del sistema sia phi = 0, cioè il pendolo si mantenga in posizione verticale.

[ ] Il problema di controllo finalizzato a trovare il controllo tau in corrispondenza del quale, a regime, la configurazione del sistema sia phi = 3/2*pi.

[ ] Il problema di controllo finalizzato a trovare il controllo tau in corrispondenza del quale, a regime, la configurazione del sistema sia phi = 0, cioè il pendolo si mantenga in posizione orizzontale.

[ ] Nessuna delle altre risposte proposte è corretta

02. Quali sono le forze agenti sul pendolo semplice?

[ ] Il corpo è soggetto alla tensione T del filo cui è collegato e alla reazione vincolare del piano al quale è appoggiato.

[x] Il corpo si muove per effetto della forza peso mg e della tensione T del filo lungo una circonferenza di raggio l.

[ ] Il corpo è soggetto alla forza peso alla reazione vincolare del piano sul quale poggia.

[ ] Nessuna delle altre risposte proposte è corretta

03. Quale delle seguenti indica correttamente l'evoluzione libera e il periodo delle oscillazioni in un pendolo semplice (approssimazione per piccole oscillazioni)?

[x] theta(t) = a*sin(omega0*t + phi), T = 2*pi*sqrt(l/g)

[ ] theta(t) = a tang(omega0*t + phi), T = 2*pi*sqrt(l/g)

[ ] theta(t) = a*sin(omega0*t + phi), T = omega0/(2*pi)

[ ] Nessuna delle altre risposte proposte è corretta

04. L'equazione del pendolo semplice per piccole oscillazioni intorno alla configurazione di riposo ha la stessa struttura dell'equazione di quale sistema meccanico a costanti concentrate?

[ ] Oscillatore smorzato.

[x] Oscillatore armonico semplice.

[ ] Oscillatore smorzato forzato.

[ ] Nessuna delle altre risposte proposte è corretta

05. Nel pendolo semplice, la componente della forza peso lungo la direzione normale vale:

[ ] Nessuna delle altre risposte proposte è corretta

[ ] Fn= - mg

[x] Fn = - mg*sin(theta)

[ ] Fn = - mg*tang(theta)

06. Con riferimento al pendolo semplice, scelta come sistema di riferimento una coppia di vettori che individuano rispettivamente la direzione del filo (radiale) e quella ortogonale ad esso (normale), quale delle seguenti è corretta?

[ ] Lungo la direzione radiale l'accelerazione del corpo è massima per effetto della tensione del filo che agisce da vincolo.

[ ] Nessuna delle altre risposte proposte è corretta

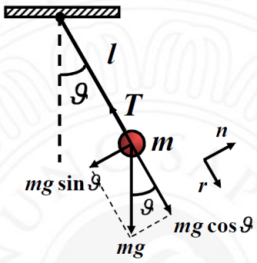
[x] Lungo la direzione radiale l'accelerazione del corpo è nulla per effetto della tensione del filo che agisce da vincolo.

[ ] La scelta di tale sistema di riferimento ci permette di limitare lo studio del moto nella direzione radiale.

07. Descrivere brevemente il modello del pendolo semplice.

Si chiama pendolo semplice un corpo puntiforme di massa m collegato all'estremo di un filo (inestensibile e di massa trascurabile) e sospeso in un piano verticale. Il filo, di lunghezza l, è bloccato, all'altro estremo, in un punto fisso.
Il corpo si muove per effetto della forza peso mg e della tensione T del filo lungo una circonferenza di raggio l.
L'equazione del moto si scrive

$$m\vec{a} = \vec{T} + m\vec{g}$$

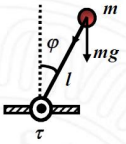


E' conveniente introdurre come sistema di riferimento una coppia di vettori che individuano rispettivamente la direzione individuata dal filo (direzione radiale r) e quella ortogonale ad esso (direzione normale n).
Lungo la direzione radiale l'accelerazione del corpo è nulla per effetto della tensione del filo che agisce da vincolo. La scelta del sistema di riferimento ci permette quindi di limitare lo studio del moto nella direzione normale.

08. Descrivere brevemente il modello del pendolo inverso.

Un'altra approssimazione di interesse è quella relativa all'intorno della configurazione di equilibrio instabile $\theta=\pi$. In tal caso si ha

$$\vartheta = \pi \Rightarrow \sin\vartheta = \pi - \vartheta$$



e si ottiene l'equazione lineare

$$ml\ddot{\vartheta} + mg\sin\vartheta = 0 \Rightarrow ml\ddot{\vartheta} + mg(\pi - \vartheta) = 0 \Rightarrow ml\ddot{\varphi} - mg\varphi = 0$$

dove nell'ultimo passaggio si è operato il cambio di variabili $\varphi=\pi-\theta$
Moltiplichiamo l'equazione per l, in modo da tramutare l'equazione alle forze in un'equazione ai corrispondenti momenti di forza. Inoltre aggiungiamo un forzamento esterno, dato dalla coppia τ. In questo modo si ha

$$ml^2\ddot{\varphi} - mgl\varphi = \tau$$

Equazione del pendolo inverso forzato

Questo modello ben si presta ad un problema di controllo in cui si voglia trovare il controllo τ in corrispondenza a cui, a regime, la configurazione del sistema sia $\varphi=0$, ovvero il pendolo si mantenga in posizione verticale.

Lezione 012

01. Considerando il problema degli oscillatori accoppiati (due corpi di massa m accoppiati elasticamente tra loro e ad una parete fissa, in presenza di attrito), quando i due oscillatori si muovono in opposizione di fase, cioè in maniera asincrona?

- [ ] Nessuna delle altre risposte proposte è corretta
- [ ] Per qualsiasi omega.
- [ ] Per omega = sqrt(k/m), dove k è la costante elastica corpo-parete.
- [x] Per omega = sqrt((k+2*h)/m), dove k è la costante elastica corpo-parete e h è la costante elastica tra i due corpi.

02. Cosa succede nel caso di oscillatori accoppiati con smorzamento?

- [x] Le oscillazioni tendono esponenzialmente a zero, tanto più velocemente quanto più è grande il contributo degli attriti.
- [ ] Le oscillazioni tendono esponenzialmente a zero, tanto più lentamente quanto più è grande il contributo degli attriti.
- [ ] Nessuna delle altre risposte proposte è corretta
- [ ] Le oscillazioni divergono, tanto più velocemente quanto più è grande il contributo degli attriti.

03. Cosa succede negli oscillatori accoppiati, dal punto di vista energetico?

- [x] L'energia si trasferisce continuamente da un oscillatore all'altro: quando l'ampiezza del moto di un oscillatore raggiunge il valore massimo, l'altra si annulla e viceversa.
- [ ] L'energia non si trasferisce continuamente da un oscillatore all'altro: ciascun oscillatore conserva il proprio valore di energia in base alla sua legge di moto.
- [ ] L'energia si trasferisce continuamente da un oscillatore all'altro: quando l'ampiezza del moto di un oscillatore raggiunge il valore massimo, l'altra raggiunge il valore massimo e viceversa.
- [ ] Nessuna delle altre risposte proposte è corretta

04. Quale delle seguenti è vera con riferimento alla soluzione del problema degli oscillatori accoppiati?

- [ ] Il moto delle masse consiste in un andamento tangenziale ad una pulsazione pari alla semidifferenza tra quella sincrona e quella asincrona, modulata da un inviluppo esponenziale di ampiezza pari al rapporto tra pulsazione sincrona e pulsazione asincrona.
- [ ] Nessuna delle altre risposte proposte è corretta
- [ ] Il moto delle masse consiste in un'oscillazione sinusoidale ad una pulsazione pari alla semidifferenza tra quella sincrona e quella asincrona, modulata da un inviluppo esponenziale di ampiezza pari al rapporto tra pulsazione sincrona e pulsazione asincrona.
- [x] Il moto delle masse consiste in una oscillazione sinusoidale ad una pulsazione media tra quella sincrona e quella asincrona, modulata da una sinusoide a pulsazione pari alla semidifferenza tra le due.

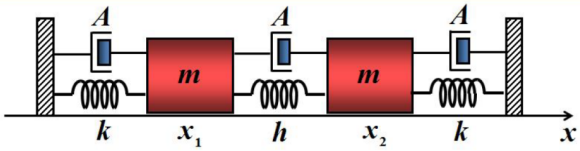
05. Nel problema degli oscillatori accoppiati, qual è la relazione tra pulsazione sincrona omega_s e pulsazione asincrona omega_a nel caso in cui tutte le molle siano identiche (i.e., h = k)?

- [x] omega_a = sqrt(3)*omega_s
- [ ] Nessuna delle altre risposte proposte è corretta
- [ ] omega_a = omega_s
- [ ] omega_a = h*k*omega_s

06. Considerando il problema degli oscillatori accoppiati (due corpi di massa m accoppiati elasticamente tra loro e ad una parete fissa, in presenza di attrito), quando i due oscillatori si muovono in fase, cioè in maniera sincrona?

- [ ] Per qualsiasi omega.
- [x] Per omega = sqrt(k/m), dove k è la costante elastica corpo-parete.
- [ ] Nessuna delle altre risposte proposte è corretta
- [ ] Per omega = sqrt((k+2*h)/m), dove k è la costante elastica corpo-parete e h è la costante elastica tra i due corpi.

07. Descrivere brevemente il modello degli oscillatori accoppiati.



Si consideri il problema di due corpi di massa m vincolati a muoversi lungo una specifica direzione. Ciascuno dei corpi è accoppiato elasticamente ad una parete fissa e sussiste inoltre tra loro un accoppiamento di tipo elastico. Il sistema evolve in presenza di attriti.

Per modellare tale sistema in prima approssimazione possiamo supporre che le forze siano centrali e che sia possibile trattare i due corpi come masse puntiformi, il che equivale a trattare il moto del loro centro di massa. Supponiamo inoltre che le molle lavorino in regime di linearità e che le costanti elastiche di corpo-parete valgano k mentre quella tra i corpi sia h . Possiamo introdurre nel modello gli attriti supponendo, come fatto in precedenza, che le forze d'attrito dipendano linearmente dalle velocità dei corpi.

Lezione 013

01. Qual è il ruolo dell'orecchio medio nell'apparato uditivo umano?

- [ ] Trasforma vibrazioni acustiche in segnali elettrici che, attraverso il nervo acustico, giungono al cervello.
- [ ] Compie una prima discriminazione sulla provenienza dello stimolo sonoro.
- [x] Ha il ruolo di adattatore di impedenza tra l'orecchio esterno e l'orecchio interno.
- [ ] Nessuna delle altre risposte proposte è corretta

02. Qual è l'organo principale dell'orecchio interno?

- [ ] Il meato uditivo.
- [ ] La cassa del timpano.
- [x] La coclea.
- [ ] Nessuna delle altre risposte proposte è corretta

03. All'interno di quale struttura avviene la trasduzione meccanico-elettrica dello stimolo sonoro?

- [x] L'organo del Corti.
- [ ] La membrana di Reissner.
- [ ] Le tube di Eustachio.
- [ ] Nessuna delle altre risposte proposte è corretta

06. Descrivere brevemente l'orecchio medio.

L'orecchio medio

L'orecchio medio è costituito dalla cassa del timpano, dalla catena degli ossicini (martello, incudine, staffa) e dalle tube di Eustachio.
La membrana timpanica, di forma conica, è collocata all'estremità interna del meato uditivo esterno.

La catena degi ossicini è unita ad una estremità alla membrana del timpano attraverso il manico del martello, dall'altra poggia sulla finestra ovale, una membrana che costituisce l'interfaccia con l'orecchio interno, attraverso la staffa. Tra questi due ossicini si trova l'incudine; dei legamenti rendono questo un sistema rigido, che si comporta come una leva, il cui fulcro si trova approssimativamente in corrispondenza del bordo della membrana timpanica.

Questo trasformatore meccanico ha il ruolo di adattatore di impedenza tra l'orecchio esterno e l'orecchio interno. Grazie al grande rapporto tra la superficie del timpano e quella della finestra ovale (circa 35 nell'orecchio umano), all'effetto leva esercitato dal sistema degli ossicini (rapporto 1.32 circa), e ad un terzo effetto dovuto al rigonfiamento del timpano (guadagno 4 circa), la pressione applicata alla staffa, in condizioni statiche, risulta 185 volte maggiore di quella applicata al timpano, mentre l'entità dello spostamento della stessa è circa i 3/4 dello spostamento del timpano.

Questo sistema massimizza l'energia trasmessa all'orecchio interno: senza di esso si calcola che circa il 98% dell'energia incidente verrebbe riflessa, e la sensibilità dell'udito risulterebbe più bassa di 15-20 dB.

In condizioni dinamiche l'orecchio medio trasferisce meglio nella banda di frequenze tra 1000 e 2000 Hz, piuttosto che altrove, a causa della risonanza generata dalla cavità in cui hanno sede i componenti dell'orecchio medio.

Importante è inoltre il ruolo di due muscoli: lo stapedio e il muscolo tensore del timpano. Quando lo stimolo sonoro è di elevata intensità (>85 dB) si attiva un processo detto *riflesso di attenuazione*; in un tempo di circa 40-80 millisecondi i due muscoli si contraggono: il tensore del timpano sposta il manico del martello dalla membrana timpanica, mentre lo stapedio stacca la staffa dalla finestra ovale. Il risultato è una opposizione di due forze che irrigidiscono la catena degli ossicini, con conseguente riduzione dell'energia trasmessa all'orecchio interno. Questo meccanismo, che introduce una non linearità nel sistema, protegge la coclea da dannose vibrazioni prodotte da suoni eccessivamente intensi, ed in particolare le stereocilia delle cellule ciliate esterne che, come vedremo, hanno un ruolo fondamentale nel processo di amplificazione cocleare.

04. Descrivere brevemente l'orecchio interno.

L'orecchio interno

L'orecchio interno si trova all'interno dell'osso temporale, uno tra le ossa più rigide e resistenti del corpo umano. E' infatti in questa zona che risiedono le strutture più delicate dell'apparato uditivo.
La *coclea*, o *chiocciola*, è l'organo principale dell'orecchio interno: è costituita da una cavità ossea che si avvolge per due giri e mezzo intorno ad un pilastro centrale detto modiolo.

Questo canale è a sua volta diviso in tre canali affiancati, detti *scalae*: la *scala vestibolare*, che segue i margini interni della spirale cocleare, la *scala media*, separata dalla scala vestibolare attraverso la *membrana di Reissner* (detta anche *membrana vestibolare*) e la *scala timpanica*, separata dalla scala media attraverso la *membrana basilare*.

La scala vestibolare e quella timpanica sono in comunicazione tra loro, ad una estremità della chiocciola, tramite un foro detto *elicotrema* e sono riempite di un liquido detto *perilinfa*. Anche la scala media è riempita di un liquido, detto *endolinfa*.
Questi liquidi non possono fuoriuscire dalla coclea in quanto le uniche aperture di questa, la finestra ovale e la finestra rotonda, sono chiuse con due membrane che oscillano concordemente con lo stimolo sonoro.

I due liquidi, incomprimibili, hanno una composizione elettrochimica diversa, così che l'endolinfa ha un potenziale elettrico maggiore della perilinfa (circa 80 mV): il sistema ha quindi a disposizione una vera e propria batteria che alimenta il processo di amplificazione cocleare.

Lungo il modiolo hanno sede le terminazioni nervose: è sostanzialmente per questo motivo che la coclea spiraleggia intorno ad esso. Per lo studio della dinamica cocleare è tuttavia conveniente pensare di srotolare la coclea, chiamando base l'estremità su cui poggia, attraverso la finestra ovale, la staffa, e apice l'estremità in cui si trova l'elicotrema.

Parleremo di direzione longitudinale riferendoci alla direzione individuata dall'asse della coclea, di direzione trasversale riferendoci a quella perpendicolare al piano su cui giace la membrana basilare nella configurazione di riposo, mentre per direzione radiale intenderemo quella ortogonale alle altre due.
La lunghezza del dotto cocleare è di circa 35 millimetri, mentre la sezione decresce nell'andare dalla base all'apice, con valori dell'ordine del mm^2. Longitudinalmente la membrana basilare non è un pezzo unico, ma un insieme di circa 3500 sottili fibre elastiche affiancate che si proiettano dal modiolo verso la parete esterna. Tali fibre sono fitte, corte e sottili alla base, mentre sono più diradate, lunghe e spesse verso l'apice. In questo modo la rigidità elastica diminuisce dalla base all'apice con legge approssimativamente esponenziale (di un fattore 50000 circa), mentre la massa aumenta con la stessa legge (di circa un fattore 10).

E' interessante notare che l'andamento della lunghezza delle fibre è l'opposto di quello che segue la larghezza del dotto cocleare (largo alla base e stretto all'apice). Ancorata sopra le sezioni di membrana basilare alloggia una complessa struttura cellulare chiamata *organo del Corti*, divisa anch'essa in moduli affiancati, all'interno della quale avviene la *trasduzione meccanico-elettrica* dello stimolo sonoro.

05. Descrivere brevemente l'orecchio esterno.

L'orecchio esterno

L'orecchio esterno, ha due funzionalità.
La complessa forma del padiglione permette la localizzazione anteriore o posteriore della sorgente rispetto all'ascoltatore, mentre la discriminazione della direzione si deve all'analisi differenziale dei segnali elettrici prodotti dalle due orecchie.

Inoltre il padiglione, con la sua forma svasata, permette di convogliare l'onda di pressione nel meato uditivo minimizzando l'energia riflessa sulla superficie di discontinuità tra mondo esterno e meato uditivo stesso, funzionando quindi da adattatore di impedenza; una situazione simile, se si eccettua il verso di propagazione dell'onda, a quella della svasatura degli strumenti a fiato, come per esempio nella tromba. Considerate le sue dimensioni, l'adattamento è migliore alle alte frequenze piuttosto che alle basse.

Lezione 014

01. Con riferimento al modello della partizione cocleare, quale delle seguenti è corretta?

- [x] Si tratta di un modello nonlineare attivo, impostato per analogia con il problema degli oscillatori accoppiati.
- [ ] Nessuna delle altre risposte proposte è corretta
- [ ] Si tratta di un modello lineare.
- [ ] Si tratta di un modello analogo all'oscillatore armonico semplice.

02. Descrivere brevemente l'organo del Corti.

L'organo del Corti è l'organo recettore che genera impulsi nervosi in risposta a vibrazioni della membrana basilare. E' diviso in circa 3500 moduli affiancati, così che ad ogni fibra di membrana basilare è associato un modulo di tale organo. Sopra ogni modulo è appoggiata una membrana gelatinosa detta *membrana tettoriale*. I singoli moduli di membrana basilare, membrana tettoriale e organo del Corti costituiscono la cosiddetta *partizione cocleare*, oggetto del nostro problema di modellazione.

Ogni modulo di organo del Corti ha al suo interno cellule sensoriali e cellule di supporto. Le cellule sensoriali, o recettoriali, sono di due tipi: *cellule ciliate interne* (*IHC, inner hair cell*) e *cellule ciliate esterne* (*OHC, outer hair cell*). Per ogni modulo ci sono una cellula ciliata interna e tre cellule ciliate esterne, le quali sono circondate da cellule di supporto (cellule pillari interne, cellule di Deiters, cellule di Hensen, cellule di Claudius).

Le cellule pillari interne ed esterne, di materiale corneo, separano le OHC dalle IHC e si vanno a saldare superiormente tra di loro e con un terrazzo rigido detto membrana reticolare.

Le cellule di Deiters dividono le OHC dalla membrana basilare, costituendo un cuscinetto viscoelastico che trasmette le forze esercitate dalle cellule ciliate. La viscosità fa in modo che le forze rapidamente variabili siano trasmesse meglio di quelle lente, così che viene compensata la minore risposta delle cellule motrici agli stimoli di alta frequenza, causata dalla capacità parassita della membrana cellulare.

Le OHC, site verso l'esterno dell'asse cocleare, sono gli amplificatori elettromeccanici della partizione cocleare. La loro lunghezza non è costante, nell'uomo varia dai 25 micron (alla base) ai 70 micron (all'apice), mentre il loro diametro è di circa 8 micron. Poggiano all'estremità inferiore sulle cellule di Deiters, mentre a quella superiore sono in contatto o meno con la membrana tettoriale a seconda che la partizione considerata sia nella regione apicale o basale della coclea.

Contraendosi e dilatandosi le OHC tendono la membrana basilare aumentandone o diminuendone la rigidità con la giusta fase per sostenerne il moto, compensando le perdite di energia causate dalle forze viscose del sistema.
In alcuni casi tale meccanismo può addirittura sovracompensare le perdite, provocando l'innesco di oscillazioni spontanee della partizione che vengono percepite come dei fischi, gli acufeni. Tale fenomeno interessa tipicamente solo una regione della coclea, infatti nella maggior parte dei casi gli acufeni hanno una frequenza dell'ordine di qualche kHz.
La motilità delle OHC è governata dalle stereocilia, sottili tubicini infissi su uno zoccolo rigido posto alla sommità della cellula ciliata. Le stereocilia, in numero di circa un centinaio per cellula, si trovano immerse nell'endolinfa, la quale si trova ad un potenziale di circa 80 mV, mentre l'interno della cellula ciliata possiede un potenziale negativo di 70 mV, mantenuto dalle batterie a sodio e potassio della membrana cellulare. Ai capi delle stereocilia si trova quindi una differenza di potenziale elettrico di circa 150 mV, in grado di generare correnti di 2-8 nA. Le stereocilia più alte si trovano infisse, attraverso la lamina reticolare, nella membrana tettoriale.

Quando la membrana basilare si piega verso la scala vestibolare, le stereocilia vengono deflesse in direzione opposta al modiolo per effetto del movimento della membrana tettoriale. Sulle punte delle stereocilia si aprono allora i canali stereociliari, i quali permettono un rapido ingresso nella cellula di ioni potassio che, con le loro cariche positive, causano la depolarizzazione della membrana cellulare e la conseguente contrazione della cellula ciliata. Questo fatto provoca un aumento della tensione applicata alla membrana basilare e quindi un irrigidimento della stessa. Viceversa quando la membrana basilare si piega verso la scala timpanica, le stereocilia si deflettono in direzione del modiolo e la cellula ciliata si iperpolarizza, ripristinando il potenziale ai capi delle stereocilia, si decontrae e diminuisce la tensione applicata alla membrana basilare.
Questo meccanismo è attivato dal moto dell'organo del Corti e controllato dal cervello attraverso un reticolo di fibre terminali del nervo cocleare che avvolgono la cellula ciliata alla base e ai lati, costituendo una sinapsi.
Le fibre provengono dal ganglio spirale di Corti, situato nel modiolo della coclea, dal quale partono assoni che vanno con il nervo cocleare al sistema nervoso centrale. Il 95% di queste fibre porta impulsi alla cellula ciliata, le restanti trasmettono segnali al cervello. Le OHC quindi non hanno un ruolo di trasduttori di segnali per il cervello se non in minima parte, mentre il ruolo principale è quello di amplificatori del moto della partizione cocleare.
Nel processo di amplificazione cocleare gioca un ruolo fondamentale la membrana tettoriale, una membrana gelatinosa che sovrasta l'organo del Corti. La sua importanza risiede nel fatto che le stereocilia più alte delle OHC sono in essa infisse e quindi un suo movimento nella direzione radiale deflette le stereocilia innescando i processi precedentemente descritti. L'esistenza di questa membrana assume quindi un significato per il fatto che il moto della partizione non avviene esclusivamente nella direzione trasversale: la complessa geometria dell'organo del Corti fa infatti sì che esso ruoti come un corpo rigido intorno ad un punto situato vicino al ponte del limbo interno. La rotazione comporta lo scorrimento reciproco tra lamina reticolare e membrana tettoriale, con conseguente deflessione delle stereocilia. Possiamo parlare a tal riguardo di trasformazione del moto trasversale in moto radiale di scorrimento.
Le misure indicano che la membrana tettoriale introduce nella partizione un secondo modo risonante di oscillazione nella direzione trasversale, ed un modo risonante nella direzione radiale, con una frequenza caratteristica mezza ottava sotto quella associata al modo trasversale. A causa della elevata viscosità, il modo trasversale introdotto dalla membrana tettoriale non è molto pronunciato e si smorza rapidamente.

03. Descrivere brevemente il modello della partizione cocleare.

Un modello più completo è il seguente. Esso si compone di due oscillatori: la membrana basilare, caratterizzata da una massa m_b, una elasticità k_b, una viscosità A_b, e la membrana tettoriale, di massa m_t, elasticità k_t, e viscosità A_t. Esse sono accoppiate attraverso l'organo del Corti ed il fluido cocleare (endolinfa) tra loro interposto, rappresentati da una elasticità e viscosità di compressione k_c e A_c. Sono presenti infine una elasticità di scorrimento k_s, che tiene conto delle forze di richiamo radiali causate dall'endolinfa e dalle stereocilia, ed una viscosità A_s, anch'essa di scorrimento, che tiene conto della viscosità del fluido stesso e degli attriti che si generano sulla superficie di contatto tra membrana tettoriale e lamina reticolare.

I due oscillatori sono vincolati da due cardini situati sul bordo del dotto cocleare . Ad essi sono applicate due forze F_t e F_b, esercitate dal fluido cocleare rispettivamente sulla membrana tettoriale e su quella basilare. A differenza del modello precedente, qui non vengono modellate tramite un'unica forza, poiché gli oggetti a cui sono applicate insistono su due punti diversi del dotto cocleare. Quando i due oscillatori sono sollecitati a muoversi lungo l'asse x, i cardini causano un moto rotatorio, ed il conseguente scorrimento tra i due.
Lo scorrimento provoca le contrazioni delle OHC, rappresentate anche in questo modello dalla non linearità dell'elasticità di membrana basilare.

Lezione 015

01. Cosa distingue un condensatore (pF - 0.1 F) dal corrispondente comportamento ideale?

☐ La presenza di capacità parassite.

■ La presenza di dissipazioni nei conduttori e sulle armature (assimilabili ad una resistenza), la presenza di un fenomeno di autoinduzione e la presenza di dissipazioni nel dielettrico.

☐ Un condensatore reale ha un comportamento esattamente corrispondente a quello di un condensatore ideale.

☐ Nessuna delle altre risposte proposte è corretta

02. Cosa distingue un resistore a filo (10 ohm - 20 megaohm) dal corrispondente comportamento ideale?

☐ Nessuna delle altre risposte proposte è corretta

☐ La presenza di una forza elettromotrice indotta.

■ La presenza di capacità parassite e di un fenomeno di autoinduzione.

☐ Un resistore a filo ha un comportamento esattamente corrispondente a quello di un resistore ideale.

03. Quale dei seguenti è il corretto enunciato della legge di Kirchhoff delle maglie?

☐ La somma delle correnti che fluiscono in una maglia individuata da N bipoli è nulla.

☐ La somma delle tensioni ai capi di N bipoli costituenti una maglia è una costante non nulla.

☐ Nessuna delle altre risposte proposte è corretta

■ La somma delle tensioni ai capi di N bipoli costituenti una maglia è nulla.

04. Quale dei seguenti è il corretto enunciato della legge di Kirchhoff dei nodi?

☐ La somma delle correnti entranti in un nodo è una costante non nulla.

☐ La somma delle tensioni ai capi di N bipoli che confluiscono in un nodo è nulla.

☐ Nessuna delle altre risposte proposte è corretta

■ La somma delle correnti entranti in un nodo è nulla.

05. Quale delle seguenti è corretta, con riferimento alle relazioni costitutive dei bipoli passivi ideali?

☐ Resistore: v(t) = R*i(t); condensatore: i(t) = *(dv(t)/dt); induttore v(t) = L*(di(t)/dt).

☐ Resistore: i(t) = R*v(t), condensatore: i(t) = C*(dv(t)/dt); induttore v(t) = L*(di(t)/dt).

■ Nessuna delle altre risposte proposte è corretta

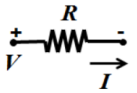
☐ Resistore: v(t) = R*i(t), condensatore: v(t) = C*(di(t)/dt); induttore i(t) = L*(dv(t)/dt).

06. Descrivere brevemente le caratteristiche dei bipoli passivi ideali.

I bipoli passivi ideali sono modellabili attraverso semplici relazioni statiche o integro-differenziali:

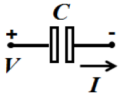
• **Resistore**

$v(t) = Ri(t) \quad V(s) = \underbrace{R}_{\text{Impedenza}} I(s) \quad V(i\omega) = \underbrace{R}_{\text{Impedenza}} I(i\omega)$



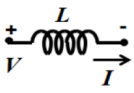
• **Condensatore**

$i(t) = C\frac{dv(t)}{dt} \quad I(s) = \underbrace{sC}_{\text{1/Impedenza}} V(s) \quad I(i\omega) = \underbrace{i\omega C}_{\text{1/Impedenza}} V(i\omega)$



• **Induttore**

$v(t) = L\frac{di(t)}{dt} \quad V(s) = \underbrace{sL}_{\text{Impedenza}} I(s) \quad V(i\omega) = \underbrace{i\omega L}_{\text{Impedenza}} I(i\omega)$

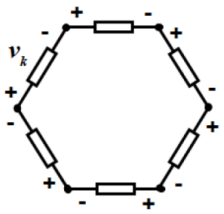


07. Enunciare le leggi di Kirchhoff.

Legge di Kirchoff delle maglie

La somma delle tensioni ai capi di N bipoli costituenti una maglia è nulla.

$$\sum_{k=1}^{N} v_k(t) = 0$$

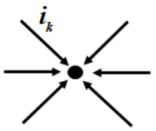


La sommatoria va intesa come somma algebrica nel senso che, fissato un verso convenzionale di circolazione nella maglia, vengono considerate positive quelle tensioni i cui segni siano concordi al verso di circolazione e negative quelle con segno discorde.

Legge di Kirchoff dei nodi

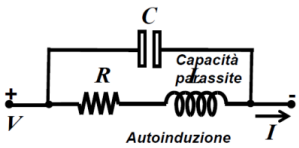
La somma delle correnti entranti in un nodo è nulla.

$$\sum_{k=1}^{N} i_k(t) = 0$$



08. Descrivere brevemente le caratteristiche dei bipoli passivi reali.

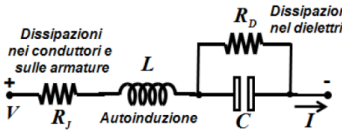
• **Resistore a filo** ***(10Ω – 20 MΩ)***

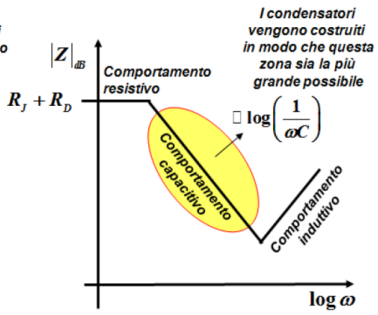


$$\frac{1}{Z(i\omega)} = \frac{1}{R + i\omega L} + i\omega C \xrightarrow{\omega \to 0} \frac{1}{R}$$

Al crescere della frequenza l'andamento dell'impedenza è prima resistivo, poi induttivo o capacitivo (a seconda dei valori di L e C), sino a che si verificano fenomeni di risonanza.

• **Condensatore** ***(pF – 0.1F)***





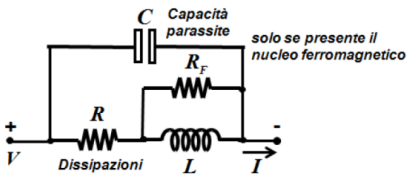
$$Z(i\omega) = R_J + i\omega L + \frac{R_D}{1 + i\omega R_D C}$$

$$Z(\omega = 0) = R_J + R_D$$

$$\lim_{\omega \to \infty} Z(i\omega) = \infty$$

Alle frequenze basse il condensatore si comporta come un resistore di altissima resistenza. C'è poi un'ampia regione di comportamento capacitivo. Intervengono quindi effetti di risonanza e a frequenze ancora superiori l'elemento reale si comporta come un induttore.

• **Induttore** ***(mH - H)***



Gli induttori si distinguono per costruzione in:

• Avvolti in aria o su supporto isolante;

• Avvolti su nucleo ferromagnetico (manifestano generalmente effetti non lineari poiché la caratteristica corrente – flusso magnetico presenta sia saturazione che isteresi).

Lezione 016

01. Perché la rappresentazione di un circuito RLC nello spazio di stato è caratterizzata da un vettore di stato di dimensione 2?

☐ Perché i sistemi elettrici a costanti concentrate ammettono sempre un vettore di stato di dimensione 2.

☐ Nessuna delle altre risposte proposte è corretta

■ Perché il circuito RLC presenta due elementi con memoria.

☐ Perché il circuito è caratterizzato da due maglie.

02. Quale delle seguenti è la corretta rappresentazione di un circuito RC nello spazio di stato?

☐ xdot = A*x(t) + B*u(t), con x = v_c, u = v_in, A = - 1/RLC, B = 1/RLC.

☐ xdot = A*x(t) + B*u(t), con x = v_c, u = v_out, A = - 1/R, B = 1/C.

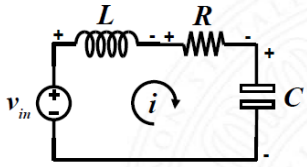
■ xdot = A*x(t) + B*u(t), con x = v_c, u = v_in, A = - 1/RC, B = 1/RC.

☐ Nessuna delle altre risposte proposte è corretta

03. Illustrare e commentare brevemente un circuito RLC.

Applicazioni - Circuito RLC

Si consideri il seguente circuito RLC che, per motivi che saranno chiari nel seguito, è detto anche *oscillatore RLC*.



Le equazioni di stato possono essere ricavate facilmente scrivendo l'equazione di maglia per le tensioni e uguagliando le correnti che scorrono nei due elementi reattivi.

$$v_{in}(t) = v_L(t) + v_R(t) + v_C(t) \Rightarrow v_{in}(t) = L\frac{di(t)}{dt}(t) + Ri(t) + v_C(t)$$

$$i_C(t) = i_L(t) \Rightarrow C\frac{dv_C(t)}{dt} = i_L(t)$$

Ponendo $v_C = x_1 \quad i_L = x_2 \quad v_{in} = u$

si ottiene un'equazione di stato del tipo $\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t)$

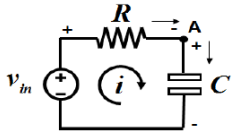
con $A = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{C} \\ -\frac{1}{L} & -\frac{R}{L} \end{bmatrix} \qquad B = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$

La trasformazione di uscita dipenderà infine dalla particolare misura che si vuole effettuare sul sistema. Abbiamo ottenuto una rappresentazione di dimensione 2, come era lecito attendersi per via del fatto che il circuito presenta due elementi con memoria. Lo stato del sistema è univocamente determinato dalla corrente che attraversa l'induttore e dalla tensione di carica del condensatore.

04. Illustrare e commentare brevemente un circuito RC.

Applicazioni - Circuito RC

Si consideri il circuito RC rappresentato in figura.



Il sistema ha un solo elemento dinamico, il condensatore. L'equazione di stato può essere ricavata facilmente scrivendo l'equazione di maglia per le tensioni e l'equilibrio delle correnti al nodo **A**.

$$v_{in}(t) = v_R(t) + v_C(t) \Rightarrow v_R(t) = v_{in}(t) - v_C(t)$$

$$i_C(t) = i_R(t) \Rightarrow C\frac{dv_C(t)}{dt} = \frac{v_R(t)}{R} \Rightarrow \frac{dv_C(t)}{dt} = -\frac{v_C(t)}{RC} + \frac{v_{in}(t)}{RC}$$

che è un'equazione del tipo

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t)$$

con

$$x = v_C \quad u = v_{in} \quad A = -1/RC \quad B = 1/RC$$

Il sistema ha un solo modo naturale di oscillazione, aperiodico, con costante di tempo $\tau = RC$.

Lezione 017

01. Qual è la funzione di trasferimento di un circuito RLC serie modellato nel dominio di Laplace, assumendo di misurare come uscita la tensione ai capi del resistore?

- [x] W(s) = sRC/(1+sRC+(s^2)*LC)
- [ ] W(s) = 1/(1+sRC+(s^2)*LC)
- [ ] Nessuna delle altre risposte proposte è corretta
- [ ] W(s) = ((s^2)*LC)/(1+sRC+(s^2)*LC)

02. Qual è la funzione di trasferimento di un circuito RLC serie modellato nel dominio di Laplace, assumendo di misurare come uscita la tensione ai capi del induttore?

- [ ] W(s) = sRC/(1+sRC+(s^2)*LC)
- [ ] Nessuna delle altre risposte proposte è corretta
- [ ] W(s) = 1/(1+sRC+(s^2)*LC)
- [x] W(s) = ((s^2)*LC)/(1+sRC+(s^2)*LC)

03. Qual è la funzione di trasferimento di un circuito RLC serie modellato nel dominio di Laplace, assumendo di misurare come uscita la tensione ai capi del condensatore?

- [ ] Nessuna delle altre risposte proposte è corretta
- [ ] W(s) = sRC/(1+sRC+(s^2)*LC)
- [x] W(s) = 1/(1+sRC+(s^2)*LC)
- [ ] W(s) = ((s^2)*LC)/(1+sRC+(s^2)*LC)

04. Qual è il comportamento qualitativo del modulo della risposta armonica dei circuiti 1) RC con uscita in tensione su C, 2) CR con uscita in tensione su R, 3) LR con uscita in tensione su R, 4) RL con uscita in tensione su L, rispettivamente?

- [ ] 1) Passa-alto, 2) passa-basso, 3) passa-alto, 4) passa-basso.
- [ ] Nessuna delle altre risposte proposte è corretta
- [x] 1) Passa-basso, 2) passa-alto, 3) passa-basso, 4) passa-alto.
- [ ] 1) Passa-basso, 2) passa-basso, 3) passa-alto, 4) passa-alto.

05. Il teorema di Thevenin prevede la sostituzione di una porzione di una rete elettrica (in corrispondenza di un taglio individuato dagli estremi A e B) con dei componenti equivalenti, in particolare un generatore ideale di tensione V_th e una impedenza serie Z_th. Quale delle seguenti è corretta?

- [x] V_th è la tensione presente tra i capi A e B del taglio, trattando il taglio come un circuito aperto; Z_th è l'impedenza tra gli estremi A e B del taglio considerando come cortocircuiti i generatori di tensione e come circuiti aperti i generatori di corrente.
- [ ] Nessuna delle altre risposte proposte è corretta
- [ ] V_th è la tensione presente tra i capi A e B del taglio, trattando il taglio come un circuito aperto; Z_th è l'impedenza tra gli estremi A e B del taglio considerando come circuiti aperti i generatori di tensione e come cortocircuiti i generatori di corrente.
- [ ] V_th è la tensione presente tra i capi A e B del taglio, trattando il taglio come un cortocircuito; Z_th è l'impedenza tra gli estremi A e B del taglio considerando come circuiti aperti i generatori di tensione e come cortocircuiti i generatori di corrente.

06. Qual è la funzione di trasferimento di un circuito CR modellato nel dominio di Laplace, assumendo di misurare come uscita la tensione ai capi della resistenza?

- [x] W(s) = sRC/(1+sRC)
- [ ] W(s) = 1/(1+sRC)
- [ ] W(s) = 1/(1+s*(L/R))
- [ ] Nessuna delle altre risposte proposte è corretta

07. Qual è la funzione di trasferimento di un circuito LR modellato nel dominio di Laplace, assumendo di misurare come uscita la tensione ai capi della resistenza?

- [x] W(s) = 1/(1+s*(L/R))
- [ ] Nessuna delle altre risposte proposte è corretta
- [ ] W(s) = 1/(1+sRLC)
- [ ] W(s) = sRLC/(1+sRLC)

08. Qual è la funzione di trasferimento di un circuito RC modellato nel dominio di Laplace, assumendo di misurare come uscita la tensione ai capi del condensatore?

- [x] W(s) = 1/(1+sRC)
- [ ] Nessuna delle altre risposte proposte è corretta
- [ ] W(s) = sRC/(1+sRC)
- [ ] W(s) = 1/(1+s*(L/R))

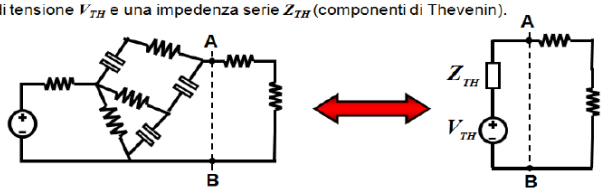
09. Qual è la funzione di trasferimento di un circuito RL modellato nel dominio di Laplace, assumendo di misurare come uscita la tensione ai capi dell'induttore?

- [ ] W(s) = sRLC/(1+sRLC)
- [ ] Nessuna delle altre risposte proposte è corretta
- [x] W(s) = (s*(L/R))/(1+s*(L/R))
- [ ] W(s) = 1/(1+s*(L/R))

10. Enunciare il teorema di Thevenin e, se possibile, mostrarne l'utilità tramite un esempio.

Teorema di Thevenin

Nel caso in cui la rete elettrica sia composta da diverse maglie, può essere comodo sostituire parti di essa con dei componenti equivalenti, in particolare un generatore ideale di tensione V_{TH} e una impedenza serie Z_{TH} (componenti di Thevenin).

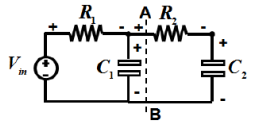


Il procedimento consiste nell'effettuare un "taglio" e sostituire la parte di rete di interesse con i componenti di Thevenin. Il loro valore si determina come segue:

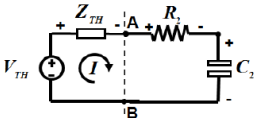
- V_{TH} è la tensione presente tra i capi A e B del taglio, trattando il taglio come un circuito aperto;
- Z_{TH} è l'impedenza tra gli estremi A e B del taglio considerando come cortocircuiti i generatori di tensione e come circuiti aperti i generatori di corrente.

Celle RC in cascata

Vediamo un esempio per chiarire il ruolo del Teorema di Thevenin nella semplificazione di reti complesse.

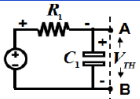


Si consideri il circuito in figura, composto da due celle RC in cascata. L'uscita sia la tensione ai capi del condensatore di capacità C_2. Per determinare la f.d.t. Possiamo effettuare un taglio tra le due celle e applicare il teorema di Thevenin. Il circuito equivalente è così il seguente.



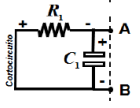
La tensione del generatore equivalente vale

$$V_{TH}(s) = \frac{Z_{C1}(s)}{Z_{C1}(s)+Z_{R1}(s)} V_{in}(s) = \frac{1}{1+sR_1C_1} V_{in}(s)$$



Per l'impedenza equivalente si ha

$$\frac{1}{Z_{TH}(s)} = \frac{1}{Z_{R1}(s)} + \frac{1}{Z_{C1}(s)} \Rightarrow Z_{TH}(s) = \frac{R_1}{1+sR_1C_1}$$



Il circuito equivalente è di facile lettura poichè si può applicare la regola del partitore.

$$V_{C2}(s) = \frac{Z_{C2}(s)}{Z_{TH}(s)+Z_{R2}(s)+Z_{C2}(s)} V_{TH}(s) = \frac{\frac{1}{sC_1}}{\frac{R_1}{1+sR_1C_1}+R_2+\frac{1}{sC_2}} \frac{1}{1+sR_1C_1} V_{in}(s)$$

Con semplici conti algebrici si ottiene infine la seguente funzione di trasferimento:

$$W(s) = \frac{V_{C2}(s)}{V_{in}(s)} = \frac{1}{1+(\tau_1+\tau_2+\tau_{12})s+\tau_1\tau_1 s^2} \qquad \begin{matrix} \tau_1 = R_1C_1 \\ \tau_2 = R_2C_2 \\ \tau_{12} = R_1C_2 \end{matrix}$$

Si noti che la f.d.t. trovata differisce dal semplice prodotto delle f.d.t. delle singole celle RC, ovvero

$$\tilde{W}(s) = \frac{1}{1+\tau_1 s}\frac{1}{1+\tau_2 s} = \frac{1}{1+(\tau_1+\tau_2)s+\tau_1\tau_1 s^2}$$

Quest'ultima f.d.t. è quella che si avrebbe se tra le celle fosse posto un opportuno disaccoppiatore. In assenza di esso c'è un accoppiamento rappresentato dal termine $\tau_{12}s$ a denominatore. Vedremo nella prossima lezione come sia possibile realizzare un *disaccoppiatore* o *buffer* tramite amplificatori operazionali.

Lezione 018

01. Quanto vale l'impedenza di ingresso dell'amplificatore operazionale in configurazione invertente?

- [ ] Nessuna delle altre risposte proposte è corretta
- [ ] Z_in = 1/Z1
- [x] Z_in = Z1
- [ ] E' infinita.

02. Qual è la funzione di trasferimento dell'amplificatore operazionale in configurazione non invertente?

- [x] W(s) = 1 + (Z2(s)/Z1(s))
- [ ] W(s) = + Z2(s)/Z1(s)
- [ ] W(s) = - Z2(s)/Z1(s)
- [ ] Nessuna delle altre risposte proposte è corretta

03. Qual è la funzione di trasferimento dell'integratore?

- [ ] Nessuna delle altre risposte proposte è corretta
- [x] W(s) = - 1/sRC
- [ ] W(s) = + 1/sRC
- [ ] W(s) = sRC

04. Qual è la funzione di trasferimento del buffer (inseguitore)?

- [x] W(s) = 1
- [ ] W(s) = - 1/sRC
- [ ] W(s) = 0
- [ ] Nessuna delle altre risposte proposte è corretta

05. Qual è la funzione di trasferimento dell'amplificatore operazionale in configurazione invertente?

- [x] W(s) = - Z2(s)/Z1(s)
- [ ] W(s) = + Z2(s)/Z1(s)
- [ ] Nessuna delle altre risposte proposte è corretta
- [ ] W(s) = 1 + (Z2(s)/Z1(s))

06. Quanto vale l'impedenza di ingresso dell'amplificatore operazionale in configurazione non invertente?

- [ ] Z_in = 1/Z1
- [ ] Nessuna delle altre risposte proposte è corretta
- [ ] Z_in = Z1
- [x] E' infinita.

07. In che cosa l'amplificatore operazionale reale si discosta da quello ideale?

- [ ] L'amplifcatore operazionale reale ha lo stesso comportamento dell'amplificatore operazionale ideale.
- [x] Il guadagno e l'impedenza di ingresso sono molto alti ma non infiniti, l'impedenza di uscita è bassa ma non nulla, la banda passante può essere di pochi MHz, è presente una tensione di offset, il guadagno dei due piedini non è mai esattamente lo stesso, gli ingressi devono mantenersi entro pochi Volt e comunque non oltre la tensione di alimentazione.
- [ ] Il guadagno e l'impedenza di ingresso sono molto bassi ma non nulli, l'impedenza di uscita è alta ma non infinita, la banda passante può essere di pochi MHz, è presente una tensione di offset, il guadagno dei due piedini non è mai esattamente lo stesso, gli ingressi devono mantenersi entro pochi Volt e comunque non oltre la tensione di alimentazione.
- [ ] Nessuna delle altre risposte proposte è corretta

08. Quale delle seguenti descrive correttamente le proprietà di un amplificatore operazionale ideale?

☐ Impedenza di ingresso nulla, impedenza di uscita infinita, guadagno infinito, larghezza di banda a catena aperta infinita, bilanciamento perfetto.

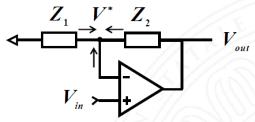
■ Impedenza di ingresso infinita, impedenza di uscita nulla, guadagno infinito, larghezza di banda a catena aperta infinita, bilanciamento perfetto.

☐ Nessuna delle altre risposte proposte è corretta

☐ Impedenza di ingresso infinita, impedenza di uscita nulla, guadagno unitario, larghezza di banda a catena aperta infinita, bilanciamento perfetto.

09. Si disegni un amplificatore operazionale in configurazione non invertente e si ricavi la relativa funzione di trasferimento.

Amplificatore operazionale in configurazione non invertente



La tensione d'ingresso è applicata al piedino non invertente, mentre la massa è applicata a monte di Z_1. Poichè gli ingressi dell'operazionale costituiscono un nodo virtuale, si ha $V^* = V_{in}$. Al nodo di tensione V^* il bilancio delle correnti, analogamente a quanto visto in precedenza, dà

$$-\frac{V^*}{Z_1}+\frac{V_{out}-V^*}{Z_2}=0 \Rightarrow -\frac{V_{in}}{Z_1}+\frac{V_{out}-V_{in}}{Z_2}=0 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \frac{V_{out}}{Z_2}=V_{in}\left(\frac{1}{Z_1}+\frac{1}{Z_2}\right) \Rightarrow \boxed{W(s)=\frac{V_{out}(s)}{V_{in}(s)}=1+\frac{Z_2(s)}{Z_1(s)}}$$

Nel caso in cui le due impedenze siano puramente resistive, ovvero

$$Z_1(s)=R_1 \qquad Z_2(s)=R_2$$

si ha

$$W(s)=\frac{V_{out}(s)}{V_{in}(s)}=1+\frac{R_2}{R_1}$$

Si è così ottenuto un amplificatore non invertente. Si noti che questo non può avere guadagno minore di 1, a differenza dell'amplificatore in configurazione invertente.

L'impedenza di ingresso vale

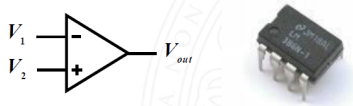
$$\boxed{Z_{in}=\frac{V_{in}}{I_{in}}=\infty}$$

poichè l'ingresso è posto direttamente sul piedino non invertente dell'operazionale, il quale, come detto in precedenza, offre impedenza d'ingresso infinita.

10. Si descriva l'amplificatore operazionale e le sue proprietà.

Amplificatore operazionale

L'amplificatore operazionale è un amplificatore ad alto guadagno, alimentato in continua, progettato per realizzare circuiti il cui comportamento ingresso-uscita è determinato principalmente da una rete di retroazione.
Di solito l'amplificatore operazionale presenta due ingressi; la figura ne mostra il simbolo circuitale.



L'ingresso contrassegnato dal segno meno è detto *invertente ed è soggetto ad un guadagno -G*, l'altro è detto *non invertente* e ha guadagno *G*.
Gli amplificatori operazionali sono prodotti in forma di integrati che possono comprendere fino a 4 amplificatori in un singolo chip dual-in-line.

Il modello dell'amplificatore operazionale ideale ha le seguenti proprietà:
• impedenza d'ingresso infinita, quindi non assorbe corrente;
• impedenza d'uscita nulla, quindi V_{out} non dipende dal carico;
• guadagno infinito, quindi $V_1=V_2$: i piedini dell'operazionale costituiscono un *nodo virtuale*;
• larghezza di banda a catena aperta infinita;
• bilanciamento perfetto, ovvero $V_{out}=0$ se $V_1=V_2$ (*reiezione di modo comune* infinita);
• caratteristiche indipendenti dalla temperatura.

L'amplificatore operazionale reale si discosta da quello ideale per molti motivi:
• il guadagno e l'impedenza d'ingresso sono molto alti ma non infiniti;
• l'impedenza d'uscita è bassa ma non nulla;
• la banda passante può essere di pochi MHz;
• è presente una tensione di offset, visibile ponendo gli ingressi a zero;
• il guadagno dei due piedini non è mai esattamente lo stesso;
• gli ingressi debbono mantenersi entro pochi volt e comunque non oltre il valore della tensione di alimentazione, altrimenti si hanno fenomeni di saturazione.

L'operazionale risulta molto utile nella progettazione dei controllori. L'utilizzo del modello dell'operazionale ideale permette lo studio dei circuiti in modo semplice ed intuitivo.

Lezione 019

01. Quanto vale l'impedenza che l'ingresso "vede" verso massa in un Negative Impedance Converter (NIC)?

- [x] Z_in = - (R1/R2)*Z
- [ ] E' nulla.
- [ ] Nessuna delle altre risposte proposte è corretta
- [ ] E' infinita.

02. Quanto vale l'impedenza di ingresso di un Generic Impedance Converter (GIC)?

- [ ] Nessuna delle altre risposte proposte è corretta
- [ ] Z_in = - (R1/R2)*Z
- [ ] E' infinita.
- [x] Z_in = (Z1*Z3*Z5)/(Z2*Z4)

03. Qual è l'espressione dell'uscita di un amplificatore differenziale in cui R3 = R1 e R4 = R2?

- [x] Vout = R2/R1 (V_in_plus - V_in_minus)
- [ ] Nessuna delle altre risposte proposte è corretta
- [ ] Vout = R2/R1 (V_in_plus * V_in_minus)
- [ ] Vout = V_in_plus - V_in_minus

04. Qual è lo scopo del sommatore?

- [ ] Restituire la più grande delle tensioni che insistono in ingresso al piedino invertente.
- [ ] Nessuna delle altre risposte proposte è corretta
- [x] Effettuare la somma di tutte le tensioni di ingresso, che viene restituita in uscita cambiata di segno.
- [ ] Effettuare la somma dei valori delle resistenze associate ai diversi ingressi che insistono sul piedino invertente.

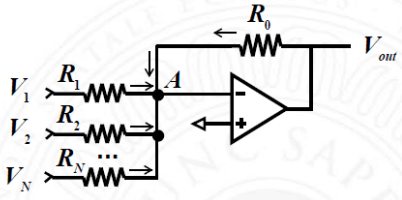
05. Si disegni un sommatore e si ricavi formula della tensione di uscita.

Sommatore

In questo caso più ingressi insistono sul piedino invertente, ciascuno attraverso una opportuna resistenza. Il bilancio delle correnti al nodo A è

$$\frac{V_1}{R_1}+\frac{V_2}{R_2}+\ldots+\frac{V_N}{R_N}+\frac{V_{out}}{R_0}=0 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow V_{out}=-R_0\sum_{i=1}^{N}\frac{V_i}{R_i}$$



Scegliendo $R_0 = R_1 = R_2 = \ldots = R_N$ si ha

$$V_{out}=-\sum_{i=1}^{N}V_i$$

Il dispositivo così costruito effettua la somma di tutte le tensioni di ingresso, cambiata di segno. Per eliminare lo sfasamento di π si può porre a valle del sommatore un amplificatore invertente a guadagno unitario.

Lezione 020

01. Qual è l'enunciato corretto del principio di Archimede?

☐ La pressione in un fluido di densità rho a profondità h dalla superficie libera, su cui si esercita una pressione esterna p0, vale p(h) = p0 + rho*g*h, dove g è l'accelerazione di gravità.

☐ Nessuna delle altre risposte proposte è corretta

☐ La variazione di massa di fluido nell'unità di tempo in un sistema di accumulo, in assenza di sorgenti interne e perdite verso l'esterno, è data dalla differenza tra la portata in massa entrante e quella uscente.

■ La spinta idrostatica che agisce su un corpo immerso in un fluido è uguale al peso del fluido spostato ed è diretta verso l'alto.

02. Qual è l'enunciato corretto della legge di Stevino?

■ La pressione in un fluido di densità rho a profondità h dalla superficie libera, su cui si esercita una pressione esterna p0, vale p(h) = p0 + rho*g*h, dove g è l'accelerazione di gravità.

☐ Nessuna delle altre risposte proposte è corretta

☐ La spinta idrostatica che agisce su un corpo immerso in un fluido è uguale al peso del fluido spostato ed è diretta verso l'alto.

☐ La variazione di massa di fluido nell'unità di tempo in un sistema di accumulo, in assenza di sorgenti interne e perdite verso l'esterno, è data dalla differenza tra la portata in massa entrante e quella uscente.

03. Cosa esprime l'equazione di conservazione della massa (anche nota come equazione di continuità)?

☐ Essa esprime il fatto che la spinta idrostatica che agisce su un corpo immerso in un fluido è uguale al peso del fluido spostato ed è diretta verso l'alto.

☐ Essa esprime il fatto che la pressione in un fluido di densità rho a profondità h dalla superficie libera, su cui si esercita una pressione esterna p0, vale p(h) = p0 + rho*g*h, dove g è l'accelerazione di gravità.

☐ Nessuna delle altre risposte proposte è corretta

■ Essa esprime localmente il fatto che la massa di fluido entrante in un tubo di flusso è pari a quella uscente a meno di accumuli locali di massa, ovvero variazioni della densità del fluido.

04. Qual è l'enunciato corretto della legge di conservazione di massa?

☐ La pressione in un fluido di densità rho a profondità h dalla superficie libera, su cui si esercita una pressione esterna p0, vale p(h) = p0 + rho*g*h, dove g è l'accelerazione di gravità.

☐ La spinta idrostatica che agisce su un corpo immerso in un fluido è uguale al peso del fluido spostato ed è diretta verso l'alto.

■ La variazione di massa di fluido nell'unità di tempo in un sistema di accumulo, in assenza di sorgenti interne e perdite verso l'esterno, è data dalla differenza tra la portata in massa entrante e quella uscente.

☐ Nessuna delle altre risposte proposte è corretta

05. Si enunci la legge di conservazione della massa nei sistemi idraulici a costanti concentrate.

Legge di conservazione di massa

Il secondo membro rappresenta, per definizione, la derivata cambiata di segno della portata in massa rispetto a x. Possiamo quindi scrivere infine

$$\frac{d\rho(t)A}{dt}+\frac{dG(x,t)}{dx}=0$$

Tale equazione è detta *equazione di conservazione della massa* o anche *equazione di continuità*. Essa esprime localmente il fatto che la massa di fluido entrante in un tubo di flusso è pari a quella uscente a meno di accumuli locali di massa, ovvero variazioni della densità del fluido.

Nel caso in cui si consideri il fluido incomprimibile, si ha

$$\frac{dG(x,t)}{dx}=0\Rightarrow G(x,t)=G(t)$$

ovvero la portata in massa è la stessa su ogni sezione del tubo di flusso. Con riferimento a due diverse sezioni 1 e 2 del tubo si ha

$$G(x_1,t)=G(x_2,t)\Rightarrow \rho A_1 v_1(t)=\rho A_2 v_2(t)\Rightarrow \frac{v_1(t)}{v_2(t)}=\frac{A_2}{A_1}$$

ovvero la velocità del fluido è inversamente proporzionale alla sezione del tubo di flusso.

Lezione 021

01. Quale delle seguenti è corretta, con riferimento ad un fluido reale?

☐ Nessuna delle altre risposte proposte è corretta

☐ Per valori del numero di Reynolds superiori ad una certa soglia si ha il passaggio dal comportamento laminare a quello turbolento.

■ In un fluido reale si distinguono due comportamenti: 1) moto laminare, e 2) moto vorticoso o turbolento.

☐ Un fluido reale non si oppone ad uno sforzo di taglio.

02. Un corpo di massa m, nel passaggio da una temperatura Ti ad una temperatura Tf, scambia con il sistema con cui è in contatto termico una quantità di calore pari a?

☐ Nessuna delle altre risposte proposte è corretta

■ Q = mc(Tf - Ti), dove c è il calore specifico ed è una costante caratteristica del corpo.

☐ Q = mc(Tf - Ti), dove c è la velocità della luce nel vuoto.

☐ Q = mc(Ti*Tf), dove c è il calore specifico ed è una costante caratteristica del corpo.

03. Qual è l'enunciato corretto della legge di Bernoulli?

☐ Nessuna delle altre risposte proposte è corretta

☐ La variazione di massa di fluido nell'unità di tempo in un sistema di accumulo, in assenza di sorgenti interne e perdite verso l'esterno, è data dalla differenza tra la portata in massa entrante e quella uscente.

■ Nel moto stazionario di un fluido ideale e incomprimibile la somma della pressione, dell'energia potenziale gravitazionale per unità di volume e dell'energia cinetica per unità di volume è costante, cioè assume lo stesso valore in corrispondenza di qualunque sezione del tubo di flusso venga misurata.

☐ La pressione in un fluido di densità rho a profondità h dalla superficie libera, su cui si esercita una pressione esterna p0, vale p(h) = p0 + rho*g*h, dove g è l'accelerazione di gravità.

04. Tramite quale quantità si esprime generalmente il passaggio dal moto laminare a quello turbolento per un fluido reale?

☐ Nessuna delle altre risposte proposte è corretta

☐ Una funzione del numero di Reynolds.

■ Il numero di Reynolds.

☐ Una funzione del numero di Avogadro.

05. Come si distingue un fluido viscoso da un fluido ideale?

Fluidi viscosi

In precedenza abbiamo definito come ideale un fluido che non si oppone ad uno sforzo di taglio. Ciò non è vero per un fluido reale, come è possibile verificare trascinando una piastra galleggiante sulla superficie di un liquido.
Da osservazioni sperimentali si osserva che la forza necessaria a muovere una piastra di area S a velocità costante v, è

$$F = \eta S \frac{v}{d}$$

ove d è la distanza tra la superficie S ed il fondo della vasca che contiene il liquido, mentre η è detto *coefficiente di viscosità*. In un fluido ideale si ha $\eta=0$.

Lezione 022

01. Quale delle seguenti affermazioni è corretta con riferimento al rendimento di una turbina Pelton?

☐ Nessuna delle altre risposte proposte è corretta

☐ Il rendimento massimo si ha quando la velocità delle pale è il doppio di quella del getto.

☐ Essendo la potenza meccanica di rotazione P_mecc una frazione della potenza idraulica P_idr, vale la relazione P_mecc = P_idr*(eta(lambda))^2.

■ Il rendimento eta è una funzione della grandezza lambda = omega*r/v, dove omega è la pulsazione di rotazione della girante ed r il suo raggio.

02. A quale categoria di turbine appartiene la turbina Pelton?

☐ Turbine di ultima generazione.

☐ Nessuna delle altre risposte proposte è corretta

☐ Turbine a reazione.

■ Turbine ad azione.

03. Quanto vale la reale portata che è possibile misurare all'uscita di una valvola?

■ G = kmax*alpha(theta)*sqrt(2*rho*(p_in - p_out))

☐ Nessuna delle altre risposte proposte è corretta

☐ G = (A_st)*sqrt(2*rho*(p_in - p_out))

☐ G = (A_st)*sqrt(2*rho*(p_in - p_st))

04. Qual è il legame ingresso-uscita che caratterizza il modello nonlineare di un ugello?

☐ v_out = (p_in - p_out), dove v_out è la velocità di uscita del fluido, p_in è la pressione in corrispondenza della sezione di ingresso e p_out è la pressione in corrispondenza della sezione di uscita.

☐ v_out = sqrt((2*p_in*p_out)/rho), dove v_out è la velocità di uscita del fluido, p_in è la pressione in corrispondenza della sezione di ingresso e p_out è la pressione in corrispondenza della sezione di uscita.

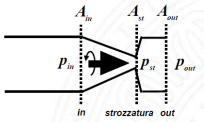
■ v_out = sqrt(2*(p_in - p_out)/rho), dove v_out è la velocità di uscita del fluido, p_in è la pressione in corrispondenza della sezione di ingresso e p_out è la pressione in corrispondenza della sezione di uscita.

☐ Nessuna delle altre risposte proposte è corretta

05. Si descrivano brevemente il ruolo e le caratteristiche della valvola di regolazione in un sistema idraulico.

Valvola di regolazione

La portata può essere modulata inserendo una *spina*, ovvero un oggetto mobile in grado di cambiare la sezione dell'ugello in prossimità della strozzatura. Si realizza in tal modo una valvola.



Sappiamo dall'equazione di conservazione della massa che se il fluido è incomprimibile la portata assume lo stesso valore in corrispondenza ad ogni sezione dell'ugello; sotto tale ipotesi la graduale chiusura della valvola determina quindi una contemporanea diminuzione della portata in tutte le sezioni, fino all'estremo in cui la chiusura totale determina l'impossibilità di immettere ulteriore fluido nel sistema.

Con riferimento alla figura, la portata, in corrispondenza alla strozzatura, vale

$$G = A_{st}\sqrt{2\rho(p_{in} - p_{st})}$$

Ci chiediamo ora se questa sia la reale portata che è possibile misurare all'uscita della valvola, il che corrisponde a dire che non ci siano "effetti di bordo" alla superficie di separazione tra la strozzatura ed il mondo esterno.

Nel caso ideale in cui non ci siano effetti di bordo si ha $p_{out}=p_{st}$ e la portata vale

$$G = A_{st}\sqrt{2\rho(p_{in} - p_{out})}$$

Nella realtà la discontinuità di sezione presente tra l'uscita della valvola ed il mondo esterno è assimilabile alla presenza di un ulteriore tratto di tubo tra la strozzatura e l'uscita, come illustrato nella precedente figura.

In tale tratto si generano moti del fluido a carattere turbolento, con dissipazione quindi di energia. Il fluido non si comporta in modo ideale e ciò è causa di un parziale recupero di pressione che dipende dal grado di apertura della valvola, per cui

$$p_{st} < p_{out}$$

Per tenere conto di questo effetto si introduce il coefficiente

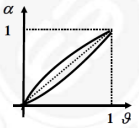
$$C_r = \sqrt{\frac{p_{in} - p_{out}}{p_{in} - p_{st}}} < 1$$

La portata può allora essere riscritta come segue

$$G = \frac{A_{st}}{C_r}\sqrt{2\rho(p_{in} - p_{out})}$$

A_{st} e C_r dipendono dall'angolo di apertura ϑ della valvola e possono essere raggruppati attraverso un unico coefficiente $K(\vartheta)$. La portata può allora essere riscritta nella forma

$$G = k(\vartheta)\sqrt{2\rho(p_{in} - p_{out})} = k_{\max}\alpha(\vartheta)\sqrt{2\rho(p_{in} - p_{out})}$$



$\alpha(\vartheta)$ è caratteristica di ogni valvola ed esprime il fatto che la portata non aumenta con l'apertura della valvola in modo strettamente lineare, ma si discosta da tale comportamento a causa delle ineliminabili imprecisioni costruttive.

Lezione 023

01. Qual è l'equazione che descrive la dinamica della temperatura T_u relativa al fluido in uscita da un serbatoio chiuso?

- [ ] Nessuna delle altre risposte proposte è corretta
- [ ] xdot = - ax + au, y = x, con a = m/G, x = T_u, u = T_i (temperatura relativa al fluido in ingresso).
- [x] xdot = - ax + au, y = x, con a = G/m, x = T_u, u = T_i (temperatura relativa al fluido in ingresso).
- [ ] E = mc^2

02. Quale delle seguenti equazioni rappresenta la dinamica di portata all'interno di una condotta idrica di sezione A costante?

- [ ] L*(dG/dt) + rho*A*g*(z_out + z_in) + A*(p_out + p_in) = 0
- [ ] L*(dG/dt) + rho*A*g*(z_out *z_in) + A*(p_out *p_in) = 0
- [x] L*(dG/dt) + rho*A*g*(z_out - z_in) + A*(p_out - p_in) = 0
- [ ] Nessuna delle altre risposte proposte è corretta

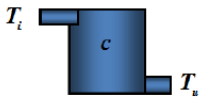
03. Qual è la relazione che descrive la dinamica di pressione sul fondo di un serbatoio a pelo libero?

- [x] A/g d(p_h)/dt = G_in - G_out, dove p_h è la pressione agente sul fondo del serbatoio.
- [ ] rho*A*dh/dt = G_in + G_out
- [ ] dm/dt = (G_in)*(G_out)
- [ ] Nessuna delle altre risposte proposte è corretta

04. Si illustri la dinamica di temperatura in un serbatoio chiuso.

Dinamica di temperatura in un serbatoio chiuso

Si consideri un serbatoio all'interno del quale un fluido incomprimibile subisce una variazione di temperatura (riscaldamento o raffreddamento). A causa della turbolenza o di appositi miscelatori, si suppone che dentro al serbatoio il miscelamento sia perfetto, e quindi che la temperatura media del fluido sia pari a quella di uscita.



Siano G la portata in massa (in Kg/s), c il calore specifico (in $J/Kg{\cdot}K$), m la massa (in Kg) e T_i, T_u le temperature (in K) relative al fluido in ingresso ed in uscita del serbatoio.
L'energia contenuta nel fluido sotto forma di calore è data da:

$$E = mcT_m$$

ove si è indicato T_m la temperatura (in K) media del fluido. Da questa equazione, utilizzando l'ipotesi di mescolamento perfetto per cui $T_m = T_u$, si ottiene

$$\frac{dE}{dt} = mc\frac{dT_u}{dt}$$

La variazione di energia termica è dovuta all'introduzione di liquido a temperatura T_i, quindi si ha

$$\frac{dE}{dt} = Gc(T_i - T_u)$$

Uguagliando le due precedenti relazioni si ha il modello matematico

$$\frac{dT_u}{dt} = \frac{G}{m}(T_i - T_u)$$

avendo scelto come grandezza fisica rappresentativa per descrivere il sistema la temperatura T_u. Posto

$$x = T_u \quad a = \frac{G}{m} \quad u = T_i \quad y = x$$

si ottiene una rappresentazione lineare e stazionaria della forma

$$\dot{x} = -ax + au \qquad y = x$$

di dimensione uno poichè vi è un solo elemento con memoria, il fluido. Si noti che tale descrizione è indipendente dal particolare fluido utilizzato, in considerazione del fatto che il calore specifico non compare nella rappresentazione.

Lezione 024

01. Quale delle seguenti affermazioni è corretta con riferimento alla rete satellitare?

☐ Nessuna delle altre risposte proposte è corretta

☐ E' utilizzata alternativamente alla rete ISDN.

☐ E' una rete a commutazione di circuito ottimizzata per le comunicazioni vocali in tempo reale.

■ E' utilizzata per il trasporto dati internazionale, per la diffusione broadcast di contenuti multimediali e per la localizzazione.

02. Quale delle seguenti affermazioni è corretta con riferimento alle PLC?

■ Le Power Line Communications codificano in formato analogico o digitale un'informazione e la inviano su reti elettriche a bassa/media/alta/altissima tensione.

☐ Sfruttano l'ADSL e utilizzano la fibra ottica come mezzo di comunicazione.

☐ Nessuna delle altre risposte proposte è corretta

☐ Costituiscono una rete di telecomunicazione indipendente.

03. Qual è la differenza tra HSPA e UMTS?

☐ UMTS usa in maniera più efficiente i canali radio messi a disposizione da HSPA, raggiunge valori massimi di trasmissione fino a 3 Mb/s aumentando le prestazioni dell'HSPA.

■ HSPA usa in maniera più efficiente i canali radio messi a disposizione da UMTS, raggiunge valori massimi di trasmissione fino a 3 Mb/s aumentando le prestazioni dell'UMTS.

☐ Sono identici, con la sola differenza che HSPA fa un uso massiccio del Bluetooth.

☐ Nessuna delle altre risposte proposte è corretta

04. Quale delle seguenti affermazioni contraddistingue le reti di nuova generazione?

■ Sono caratterizzate (i) da un uso efficiente delle risorse ma da poca o nessuna QoS, (ii) da una trasmissione delle informazioni in formato digitale a pacchetto usando meccanismi di trasporto differenti ed incompatibili, (iii) da infrastrutture di rete e servizi realizzati ad-hoc e riusabili solo in parte in reti differenti, e (iv) da terminali dotati di tecnologie di accesso eterogenee.

☐ Nessuna delle altre risposte proposte è corretta

☐ Garantiscono la massima QoS e l'interoperabilità tra tecnologie eterogenee.

☐ Sono caratterizzate (i) da un uso inefficiente delle risorse per garantire la QoS, (ii) da una trasmissione delle informazioni in formato analogico o digitale, a circuito o a pacchetto usando meccanismi di trasporto differenti e incompatibili, e (iii) da infrastrutture di rete e servizi realizzati ad-hoc e non riusabili in reti differenti.

05. Quale delle seguenti affermazioni NON è corretta, con riferimento alle Next Generation Networks (NGN)?

☐ Una NGN è una rete a pacchetti capace di usare le tecnologie di trasporto Broadband e QoS-enabled e capace di fornire servizi eterogenei indipendentemente dal sottostante strato di trasporto.

☐ Una NGN deve fornire supporto alla mobilità per una fornitura di servizi affidabile e ubiqua.

☐ Nessuna delle risposte proposte.

■ Una NGN non prevede trasferimento a pacchetti.

06. Quale delle seguenti affermazioni contraddistingue le reti di vecchia generazione?

☐ Nessuna delle altre risposte proposte è corretta

☐ Sono caratterizzate (i) da un uso efficiente delle risorse ma da poca o nessuna QoS, (ii) da una trasmissione delle informazioni in formato digitale a pacchetto usando meccanismi di trasporto differenti ed incompatibili, (iii) da infrastrutture di rete e servizi realizzati ad-hoc e riusabili solo in parte in reti differenti, e (iv) da terminali dotati di tecnologie di accesso eterogenee.

☐ Garantiscono la massima QoS e l'interoperabilità tra tecnologie eterogenee.

■ Sono caratterizzate (i) da un uso inefficiente delle risorse per garantire la QoS, (ii) da una trasmissione delle informazioni in formato analogico o digitale, a circuito o a pacchetto usando meccanismi di trasporto differenti e incompatibili, e (iii) da infrastrutture di rete e servizi realizzati ad-hoc e non riusabili in reti differenti.

07. Quale delle seguenti affermazioni NON è corretta, con riferimento alla rete LTE?

- [ ] Nessuna delle risposte proposte.
- [ ] La rete LTE è un'evoluzione di UMTS (3,5G).
- [ ] Garantisce un'efficienza spettrale 3 volte superiore rispetto a HSPA.
- [x] E' cronologicamente precedente rispetto a UMTS.

08. Quale delle seguenti affermazioni è corretta con riferimento alla rete PSTN?

- [ ] Nessuna delle altre risposte proposte è corretta
- [x] La PSTN è una rete di telecomunicazione fissa di vecchia generazione.
- [ ] La PSTN è una rete di telecomunicazione mobile di vecchia generazione.
- [ ] La PSTN è una rete di telecomunicazione fissa di nuova generazione.

09. Qual è la sequenza cronologica corretta con la quale sono state sviluppate le reti mobili cellulari?

- [ ] 1) EDGE, 2) GSM, 3) GPRS, 4) ETACS.
- [ ] 1) GSM, 2) ETACS, 3) GPRS, 4) EDGE.
- [ ] Nessuna delle altre risposte proposte è corretta
- [x] 1) ETACS, 2) GSM, 3) GPRS, 4) EDGE.

10. Si enuncino le caratteristiche principali delle reti di prossima generazione (Next Generation Networks).

Le reti di prossima generazione

Definizione della INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION

- Una Next Generation Network (NGN) è una rete a pacchetti capace di usare le tecnologie di trasporto Broadband e QoS-enabled e capace di fornire servizi eterogenei indipendentemente dal sottostante strato di trasporto
- Una NGN deve offrire agli utenti un accesso non vincolato ai fornitori di servizi.
- Una NGN deve fornire supporto alla mobilità per una fornitura di servizi affidabile e ubiqua.

Una NGN deve essere caratterizzata da:

- Trasferimento a pacchetti
- Separazione delle funzionalità di rete:
  - Trasporto,
  - Segnalazione,
  - Applicazioni e Servizi
  - Fornitura di interfacce e protocolli aperti

Lezione 025

01. Quale delle seguenti affermazioni è corretta, con riferimento alle tecniche di allocazione del canale utilizzate dai protocolli di controllo di accesso alla rete?

☐ Vengono generalmente utilizzati l'approccio closed-loop o reattivo e l'approccio open-loop o proattivo.

☐ Nell'allocazione statica il canale viene assegnato di volta in volta a chi ne fa richiesta per essere poi liberato; invece, nell'allocazione dinamica, il canale viene partizionato ed ogni partizione viene assegnata ad una sorgente.

■ Nell'allocazione statica il canale viene partizionato ed ogni partizione viene assegnata ad una sorgente; invece, nell'allocazione dinamica il canale viene assegnato di volta in volta a chi ne fa richiesta per essere poi liberato.

☐ Nessuna delle altre risposte proposte è corretta

02. A cosa servono gli algoritmi di CAC e quali sono i requisiti di QoS?

☐ Gli algoritmi di CAC servono ad effettuare il tracking di un riferimento mobile. I requisiti di QoS sono parametri aggiornati dinamicamente a seconda delle misure prese dai sensori dislocati sulla rete.

☐ Gli algoritmi di CAC sono finalizzati a ridurre la congestione di rete. I requisiti di QoS sono quantità dinamiche espresse in termini di mobility e security.

■ Gli algoritmi di CAC decidono l'ammissione o il rifiuto di una nuova connessione con requisiti di QoS. Questi ultimi sono parametri statici espressi in termini di capacità di trasmissione garantita, delay e jitter.

☐ Nessuna delle altre risposte proposte è corretta

03. Che cosa si intende per congestione di rete e qual è un esempio di protocollo di controllo di congestione?

☐ La congestione è quella situazione in cui l'informazione trasmessa nella rete è insufficiente e la trasmissione di informazione è conseguentemente inibita. Un esempio di protocollo di controllo di congestione è il CAC.

■ La congestione è quella situazione in cui la rete non ha sufficienti risorse per trasmettere i dati provenienti dalle sorgenti. Un esempio di protocollo di controllo di congestione è il TCP.

☐ Nessuna delle altre risposte proposte è corretta

☐ La congestione è quella situazione in cui viene diminuita la velocità di immissione delle informazioni nella rete a causa dello scarto dei pacchetti in eccesso. Un esempio di protocollo di controllo di congestione è il TCP.

04. Quali sono le principali risorse di una rete di comunicazione?

☐ I link e la congestione di rete.

☐ Nessuna delle altre risposte proposte è corretta

☐ Il buffer, che costituisce una risorsa condivisa, e le bande, cioè dei "contenitori" residenti sui nodi della rete in cui sono accumulati i pacchetti che aspettano di essere trasmessi.

■ La capacità di trasmissione o banda, che costituisce una risorsa condivisa, e i buffer, cioè dei "contenitori" residenti sui nodi della rete in cui sono accumulati i pacchetti che aspettano di essere trasmessi.

05. Quale delle seguenti NON è rilevante ai fini della modellazione di una rete di telecomunicazione satellitare?

☐ La presenza di ritardi di comunicazione.

☐ Nessuna delle risposte proposte.

☐ Il fatto che il mezzo di comunicazione è condiviso, per cui è necessario gestire in maniera opportuna le risorse a disposizione.

■ La presenza di motori elettrici.

06. Quali sono gli elementi costitutivi di una rete di comunicazione?

☐ I link di comunicazione, cioè i punti della rete cui afferiscono uno o più nodi, e i nodi, cioè i collegamenti fisici tra link (su cavo o wireless).

☐ Nessuna delle altre risposte proposte è corretta

☐ Sensori in corrispondenza dei canali e attuatori in corrispondenza dei nodi.

■ I link di comunicazione, cioè i collegamenti fisici tra nodi (su cavo o wireless), e i nodi, cioè i punti della rete cui afferiscono uno o più canali.

07. Si illustri brevemente come e mediante quali protocolli avviene la gestione delle risorse in reti di telecomunicazione.

Le *risorse* di una rete di telecomunicazione sono:

• *Capacità di trasmissione o banda* (espressa in bit per secondo [bps], [kbps], [Mbps]): può costituire una risorsa condivisa. La capacità di trasmissione deve essere assegnata – in maniera prefissata o dinamica – agli utenti (controllo di accesso). Gli utenti sono in competizione per accedere al mezzo di trasmissione.

• *Buffer*: sono dei "contenitori" risiedenti sui nodi della rete in cui sono accumulati i dati in termini di bit o aggregati di bit, detti *pacchetti*, che aspettano di essere trasmessi. Se i pacchetti entranti nel buffer non trovano lo spazio necessario nei buffer stessi, vengono scartati (congestione).

I *protocolli fondamentali* per la gestione delle risorse in reti di telecomunicazione possono essere classificati come segue:

• *Protocolli di controllo di accesso* alla rete: sono richiesti nelle reti il cui mezzo trasmissivo è condiviso dagli utilizzatori (reti satellitari, wireless).

• *Protocolli di controllo di congestione* della rete: sono finalizzati ad evitare (per quanto possibile) trabocchi (*overflow*) dei buffer dei nodi della rete.

• *Protocolli di controllo di ammissione delle connessioni (CAC)* nella rete: sono finalizzati a decidere sull'ammissione di nuove connessioni nella rete.

Lezione 026

01. Ogni tipo di rete di comunicazione terrestre o wireless può essere ricondotto ad uno schema a blocchi che contiene i seguenti elementi:

☐ Nessuna delle altre risposte proposte è corretta

☐ Controllore, ritardo, attuatore, variabile di riferimento, azione di controllo.

■ Controllore, ritardo, rete senza ritardo, variabile di riferimento, azione di controllo, disturbi.

☐ Controllore, rete senza ritardo, variabile di riferimento, azione di controllo, disturbi.

02. Nell'esempio del controllo di accesso per reti satellitari, con quale approccio opera l'algoritmo del Bandwidth-on-Demand Controller (implementato nell'NCC)?

☐ Nessuna delle altre risposte proposte è corretta

☐ Se non c'è congestione, il rate assegnato è maggiore di quello richiesto. Se c'è congestione, assegna tutta la capacità richiesta. Se è disponibile della capacità non richiesta (free capacity), il rate assegnato è minore di quello richiesto.

■ Se non c'è congestione, assegna tutta la capacità richiesta. Se c'è congestione, il rate assegnato è minore di quello richiesto. Se è disponibile della capacità non richiesta (free capacity), il rate assegnato è maggiore di quello richiesto.

☐ Se non c'è congestione, il rate assegnato è minore di quello richiesto. Se c'è congestione, assegna tutta la capacità richiesta. Se è disponibile della capacità non richiesta (free capacity), il rate assegnato è maggiore di quello richiesto.

03. Nell'esempio del controllo di accesso per reti satellitari, il ritardo complessivo nella comunicazione tra terminali utenti UT si compone dei seguenti ritardi elementari:

☐ Nessuna delle altre risposte proposte è corretta

■ Ritardi dovuti al collegamento terrestre (UT1-ES1, ES2-UT2), ritardo di feedback (ES-satellite-NCC-satellite-ES), ritardo dovuto al collegamento satellitare (ES1-satellite-ES2).

☐ Ritardo di feedback (ES-satellite-NCC-satellite-ES) e ritardo dovuto al collegamento satellitare (UT1-ES1, ES2-UT2).

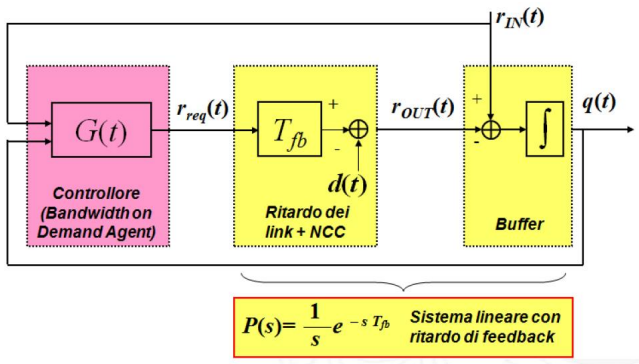
☐ Ritardi dovuti al collegamento satellitare (UT1-satellite, satellite-UT2), ritardo dovuto al collegamento terrestre (ES1-NCC-ES2).

04. Si mostri un esempio di controllo di accesso per reti satellitari, anche mediante l'aiuto di uno schema a blocchi.

Lo scenario che qui ci interessa considerare è caratterizzato da
- un satellite in orbita geostazionaria (*on-board switching*);
- un centro di controllo della rete (NCC);
- terminali satellitari (ST), di seguito chiamati anche stazioni di Terra (ES);
- terminali utenti (UT) collegati ai terminali satellitari;

A questi elementi possono aggiungersi i *Gateway,* che collegano la rete satellitare alla rete core (cioè Internet). Questi elementi tuttavia non sono di interesse in quanto segue.

Il ritardo complessivo nella comunicazione tra UT si compone dei seguenti ritardi elementari:
- T_1, T_2 : ritardi dovuti al collegamento terrestre (UT_1-ES_1, ES_2-UT_2)
- T_{fb} : ritardo di feedback (ES_1-Satellite-NCC-Satellite-ES_1)
- T_{RTD} : ritardo dovuto al collegamento satellitare (ES_1-Satellite-ES_2)



Lezione 027

01. Quale delle seguenti affermazioni è corretta con riferimento alla trasformata Z?

[x] La trasformata Z è un operatore lineare; la trasformata Z di un segnale ritardato di nT è pari alla trasformata Z del segnale non ritardato moltiplicata per il ritardo z^(-n).

[ ] La trasformata Z è un operatore nonlineare; la trasformata Z di un segnale ritardato di nT è pari alla trasformata Z del segnale non ritardato moltiplicata per il ritardo z^(-n).

[ ] Nessuna delle altre risposte proposte è corretta

[ ] La trasformata Z è un operatore lineare; la trasformata Z di un segnale ritardato di nT è pari alla trasformata Z del segnale non ritardato moltiplicata per il ritardo z^(+n).

02. Quanto vale la funzione di trasferimento W(z) di un sistema lineare e stazionario calcolata con il metodo di discretizzazione di Eulero in avanti?

[ ] Nessuna delle altre risposte proposte è corretta

[ ] W(z) corrisponde alla W(s) calcolata in s = 2/T*(1-z^(-1))/(1+z^(-1)).

[ ] W(z) corrisponde alla W(s) calcolata in s = (z-1)/(T*z).

[x] W(z) corrisponde alla W(s) calcolata in s = (z-1)/T.

03. Cos'è la trasformata Z?

[ ] E' la procedura che consente di passare dalla funzione di trasferimento ad un equivalente modello nello spazio di stato del sistema.

[x] E' una particolare operazione che dà come risultato una funzione nella variabile complessa. E' l'analogo della operazione di trasformata di Laplace per i sistemi dinamici a tempo discreto.

[ ] E' la procedura che consente di trovare l'analogo tempo continuo di un sistema tempo discreto.

[ ] Nessuna delle altre risposte proposte è corretta

04. Quale delle seguenti affermazioni è corretta con riferimento alla trasformazione z = e^(sT)?

[x] Mappa il semipiano sinistro del piano s nel cerchio unitario del piano z, che rappresentano rispettivamente le regioni di stabilità pr i sistemi a tempo continuo e a tempo discreto.

[ ] Mappa il cerchio unitario del piano s nel semipiano sinistro del piano z, che rappresentano rispettivamente le regioni di stabilità per i sistemi a tempo continuo e a tempo discreto.

[ ] Mappa il semipiano sinistro del piano s nel semipiano sinistro del piano z, che rappresentano rispettivamente le regioni di stabilità per i sistemi a tempo continuo e a tempo discreto.

[ ] Nessuna delle altre risposte proposte è corretta

05. Quale delle seguenti è vera quando si genera aliasing?

[ ] Nessuna delle altre risposte proposte è corretta

[x] Si sta effettuando un cattivo campionamento.

[ ] E' stata effettuata una discretizzazione esatta.

[ ] Si sta effettuando unbuon campionamento.

06. Qual è il corretto enunciato del teorema del campionamento?

[ ] Per poter ricostruire il segnale analogico a partire dalla sua versione campionata, la pulsazione di campionamento deve essere almeno la metà della massima pulsazione presente nel segnale originario (cioè la cosiddetta pulsazione di Nyquist).

[ ] Nessuna delle altre risposte proposte è corretta

[x] Per poter ricostruire il segnale analogico a partire dalla sua versione campionata, la pulsazione di campionamento deve essere almeno il doppio della massima pulsazione presente nel segnale originario (cioè la cosiddetta pulsazione di Nyquist).

[ ] Per poter ricostruire il segnale analogico a partire dalla sua versione campionata, la pulsazione di campionamento deve essere almeno il triplo della massima pulsazione presente nel segnale originario (cioè la cosiddetta pulsazione di Nyquist).

07. Descrivere il metodo di Eulero in avanti.

Uno dei punti chiave nel passaggio da una rappresentazione tempo continuo alla sua versione tempo dscreto è il trattamento degli operatori di derivazione e integrazione. Vediamo dunque alcuni metodi per la loro discretizzazione.

Consideriamo l'equazione

$$\frac{dy(t)}{dt} = u(t)$$

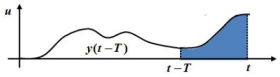
in cui supponiamo che $u(t)$ sia un segnale noto, mentre $y(t)$ sia il segnale incognito.

Supponiamo di aver scelto un intervallo di campionamento T ed integriamo su tale intervallo ambo i membri della precedente equazione

$$\int_{t-T}^{t} \frac{dy(t)}{dt} dt = \int_{t-T}^{t} u(t)dt \Rightarrow$$

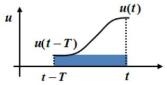
$$\Rightarrow y(t) = y(t-T) + \int_{t-T}^{t} u(t)dt$$

Queste relazioni ci dicono che la funzione $y(t)$ è l'integrale della funzione $u(t)$ e che il suo valore al tempo t è la somma del suo valore al tempo t-T e dell'integrale di $u(t)$ tra t-T e t.



Ci chiediamo ora come approssimre l'area del trapezoide sottesa da $u(t)$ tra t-T e t.

Una possibilità è quella di approssimarla con la quantità $Tu(t-T)$. Si parla in tal caso di *discretizzazione in avanti* (EA).



Si ha allora

$$y(t) = y(t-T) + Tu(t-T)$$

Ponendo $t=hT$, e passando così dalle funzioni tempo continuo alle sequenze, si ottiene quindi algoritmo

$$y[h] = y[h-1] + Tu[h-1]$$

Trasformando questa equazione secondo Z si ha

$$(1 - z^{-1})Y(z) = Tz^{-1}U(z)$$

e si ottiene la funzione di trasferimento nel dominio Z

$$W(z) = \frac{Y(z)}{U(z)} = \frac{T}{z-1}$$

La funzione di trasferimento dell'integratore nel dominio s vale

$$W(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{1}{s}$$

Da cui segue che la funzione di trasferimento $W(z)$ di un generico sistema lineare e stazionario può essere determinata, con il metodo di discretizzazione in avanti, attraverso la relazione

$$W(z) = W(s)\Big|_{s=\frac{z-1}{T}}$$

La $W(z)$ così trovata può essere antitrasformata per ottenere, nel dominio del tempo discreto, un algoritmo implementabile su calcolatore.

Lezione 028

01. Che rapporto c'è tra metodi di Eulero in avanti e all'indietro e trasformata di Tustin, da un lato, e la trasformazione z = e^(sT), dall'altro?

- [ ] Nessuna delle altre risposte proposte è corretta
- [ ] Le prime tre trasformazioni sono rappresentazioni alternative della trasformazione z = e^(sT).
- [x] Le prime tre trasformazioni costituiscono approssimazioni della trasformazione z = e^(sT).
- [ ] Le prime tre trasformazioni sono correzioni della trasformazione z = e^(sT) a scopo implementativo.

02. Quanto vale la funzione di trasferimento W(z) di un sistema lineare e stazionario calcolata attraverso la trasformata bilineare di Tustin?

- [x] W(z) corrisponde alla W(s) calcolata in s = 2/T*(1-z^(-1))/(1+z^(-1)).
- [ ] W(z) corrisponde alla W(s) calcolata in s = (z-1)/(T*z).
- [ ] W(z) corrisponde alla W(s) calcolata in s = (z-1)/T.
- [ ] Nessuna delle altre risposte proposte è corretta

03. Quanto vale la funzione di trasferimento W(z) di un sistema lineare e stazionario calcolata con il metodo di discretizzazione di Eulero all'indietro?

- [ ] W(z) corrisponde alla W(s) calcolata in s = 2/T*(1-z^(-1))/(1+z^(-1)).
- [ ] W(z) corrisponde alla W(s) calcolata in s = (z-1)/T.
- [ ] Nessuna delle altre risposte proposte è corretta
- [x] W(z) corrisponde alla W(s) calcolata in s = (z-1)/(T*z).

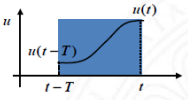
04. Quale delle seguenti è la rappresentazione corretta della trasformata bilineare di Tustin?

- [ ] Nessuna delle altre risposte proposte è corretta
- [ ] z = 1/(1 - sT).
- [ ] z = 1 + sT.
- [x] s = 2/T*(1-z^(-1))/(1+z^(-1)).

05. Descrivere il metodo di Eulero all'indietro.

Metodo di Eulero all'indietro

Un'altro modo di approssimare il trapezoide precedentemente introdotto è quello di considerare il rettangolo di area *Tu(t)*. In tal caso si parla di *discretizzazione all'indietro* (*EI*).



Si ha allora

$$y(t) = y(t-T) + Tu(t)$$

Passando alle sequenze si ha il seguente algoritmo:

$$y[h] = y[h-1] + Tu[h]$$

Trasformando questa equazione secondo Z si ha

$$(1-z^{-1})Y(z) = TU(z)$$

e si ottiene la funzione di trasferimento nel dominio Z

$$W(z) = \frac{Y(z)}{U(z)} = \frac{Tz}{z-1}$$

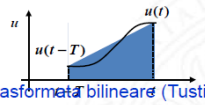
Dal confronto con la funzione di trasferimento dell'integratore nel dominio s si ha che la *W(z)*, per un generico sistema lineare e stazionario, può essere determinata, con il metodo di discretizzazione all'indietro, attraverso la relazione

$$W(z) = W(s)\Big|_{s=\frac{z-1}{Tz}}$$

06. Descrivere il metodo della trasformata bilineare (o metodo di Tustin).

Trasformata bilineare (Tustin)

Una terza possiblità di approssimazione del trapezoide è quella di considerare il trapezio evidenziato in figura, la cui area vale *T(u(t)+u(t-T))/2*.



Trasformata bilineare (Tustin)

Si ha in tal caso

$$y(t) = y(t-T) + \frac{T}{2}\left[u(t) + u(t-T)\right]$$

e passando alle sequenze si ottiene l'algoritmo:

$$y[h] = y[h-1] + \frac{T}{2}\left(u[h] + u[h-1]\right)$$

Trasformando secondo Z si ha

$$(1-z^{-1})Y(z) = \frac{T}{2}(1+z^{-1})U(z)$$

da cui si ottiene la funzione di trasferimento

$$W(z) = \frac{Y(z)}{U(z)} = \frac{T}{2}\frac{1+z^{-1}}{1-z^{-1}}$$

Ragionando come prima si ha, in questo caso, che la *W(z)* di un generico sistema lineare e stazionario può essere calcolata attraverso la relazione

$$W(z) = W(s)\Big|_{s=\frac{2}{T}\frac{1-z^{-1}}{1+z^{-1}}}$$

Il mapping

$$s = \frac{2}{T}\frac{1-z^{-1}}{1+z^{-1}}$$

è noto con il nome di *trasformata bilineare* o anche *trasformazione di Tustin*.

Lezione 029

01. Quale delle seguenti indica la procedura corretta prevista dal metodo di discretizzazione basato sullo ZOH?

☐ 1) Calcolo W(z) dello ZOH, 2) calcolo risposta transitoria del parallelo ZOH + processo, 3) antitrasformata Z.

■ 1) Calcolo W(s) dello ZOH, 2) calcolo risposta impulsiva della cascata ZOH - processo, 3) calcolo della risposta impulsiva ad intervalli di tempo distanti T, 4) trasformata della risposta impulsiva campionata per ottenere W(z).

☐ Nessuna delle altre risposte proposte è corretta

☐ 1) Calcolo W(s) dello ZOH, 2) calcolo risposta a regime della cascata ZOH - processo, 3) trasformata Z per ottenere W(z).

02. Quanto vale la funzione di trasferimento di uno ZOH?

☐ Nessuna delle altre risposte proposte è corretta

☐ W(s) = 1/s.

■ W(s) = (1 - e^(-sT))/s.

☐ W(s) = s/(1 - e^(-sT)).

03. Quale delle seguenti è la corretta definizione di ZOH?

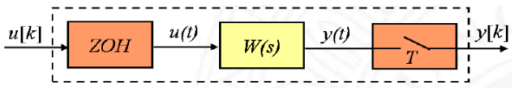
☐ Uno ZOH (Zero Order Holder) è un dispositivo che prende in ingresso una sequenza di campioni e genera un segnale costante a tratti a tempo continuo, semplicemente producendo una rampa per ogni campione della sequenza durante l'intervallo di campionamento T.

☐ Nessuna delle altre risposte proposte è corretta

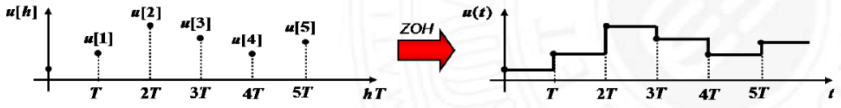
☐ Uno ZOH (Zero Order Holder) è un dispositivo che prende in ingresso una sequenza di campioni e genera un segnale costante a tratti a tempo continuo, semplicemente producendo un impulso per ogni campione della sequenza durante l'intervallo di campionamento T.

■ Uno ZOH (Zero Order Holder) è un dispositivo che prende in ingresso una sequenza di campioni e genera un segnale costante a tratti a tempo continuo, semplicemente mantenendo costante ogni campione della sequenza durante l'intervallo di campionamento T.

04. Si descriva il comportamento di un mantenitore di ordine zero (ZOH) e si ricavi la relativa funzione di trasferimento.



Lo ZOH prende in ingresso una sequenza e genera un segnale costante a tratti tempo continuo, semplicemente mantenendo costante ogni campione della sequenza durante l'intervallo di campionamento T.



Il segnale $u(t)$ va in ingresso al sistema analogico che risponde con un segnale $y(t)$, il quale viene poi campionato con un intervalllo di campionamento T pari a quello della sequenza di ingresso $u[h]$. Ingresso e uscita del dispositivo sono segnali campionati, il dispositivo è quindi un sistema a tempo discreto.

Il metodo di discretizzazione basato sullo ZOH consiste nel passare dal dominio s al dominio z associando alla funzione di trasferimento $W(s)$ del processo la funzione di trasferimento $W(z)$ del dispositivo digitale costituito da ZOH, processo e campionatore. In pratica ciò che occorre fare è:

1. determinare la funzione di trasferimento $W_{ZOH}(s)$ dello ZOH;
2. calcolare la risposta impulsiva del sistema costituito dallo ZOH e dal processo posti in cascata;
3. calcolare la risposta impulsiva ad intervalli di tempo distanti T, in modo da ottenere la risposta impulsiva nel dominio discreto;
4. trasformare la risposta impulsiva campionata ottenendo così la funzione di trasferimento nel dominio z.

Lezione 030

01. Qual è la differenza tra FOH e ZOH?

☐ Nessuna delle altre risposte proposte è corretta

■ Un FOH (First Order Holder), anziché produrre in uscita funzioni costanti a tratti, esegue una interpolazione lineare dei campioni della sequenza in ingresso.

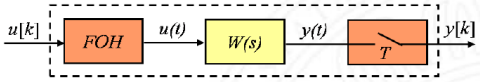
☐ Un FOH (First Order Holder), a differenza dello ZOH, esegue una approssimazione al primo ordine.

☐ Un FOH (First Order Holder), anziché eseguire una interpolazione lineare dei campioni della sequenza in ingresso, produce in uscita funzioni costanti a tratti.

02. Si descriva il comportamento di un mantenitore di ordine uno (FOH), anche con l'ausilio di grafici.

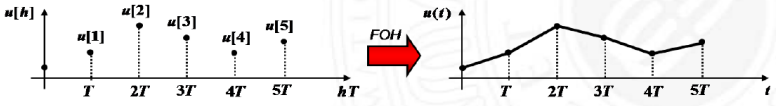
Mantenimento di ordine uno (FOH)

Una variante del metodo appena presentato è quella in cui, in luogo dello ZOH, si utilizzi il cosiddetto *mantenitore di ordine uno* (*First Order Hold - FOH*).



A differenza dello ZOH, che produce in uscita funzioni costanti a tratti, Il FOH esegue una interpolazione lineare dei campioni della sequenza in ingresso $u[h]$. Il segnale in uscita dal FOH è

$$u(t) = u[h] + \frac{t - hT}{T}\left(u[h+1] - u[h]\right) \quad hT \le t \le (h+1)T$$



La procedura di discretizzazione è la stessa vista in precedenza, con la differenza di dover utilizzare la funzione di trasferimento del FOH in luogo di quella dello ZOH.

Questo metodo è generalmente più accurato del metodo basato su ZOH per sistemi comandati da ingressi lentamente variabili (segnali *smooth*). Esso è anche noto con il nome di *triangle approximation* o anche *ramp-invariant approximation*, poichè è libero da distorsione per ingressi a rampa.

Lezione 031

01. Con quale delle seguenti sintassi può essere definita una matrice in MATLAB?

- [ ] A = (7 8 // 8.9 7 // 9 8)
- [ ] A = ([7] [8] // [8.9] [7] // [9] [8])
- [ ] Nessuna delle altre risposte proposte è corretta
- [x] A = [7 8; 8.9 7; 9 8]

02. Cosa consente di fare l'istruzione A(n, :) in MATLAB?

- [ ] Nessuna delle altre risposte proposte è corretta
- [x] Consente di estrarre l'n-esima riga della matrice A.
- [ ] Consente di estrarre l'n-esima colonna dalla matrice A.
- [ ] Consente di estrarre l'elemento di posto (n, m) dalla matrice A.

03. Quale delle seguenti affermazioni è corretta con riferimento alla definizione di una matrice in MATLAB?

- [ ] Un punto e virgola separa gli elementi di una stessa riga; uno spazio indica la fine di una riga.
- [ ] Uno spazio separa gli elementi di una stessa riga; una virgola indica la fine di una riga.
- [ ] Nessuna delle altre risposte proposte è corretta
- [x] Uno spazio separa gli elementi di una stessa riga; un punto e virgola indica la fine di una riga.

04. Cosa genera la funzione eye(n,m) in MATLAB?

- [ ] Una matrice di zeri.
- [ ] Una matrice di numeri casuali.
- [x] Una matrice n x m con uni sulla diagonale principale e zeri altrove.
- [ ] Nessuna delle altre risposte proposte è corretta

05. Cosa consente di fare l'istruzione linspace(a,b,N) in MATLAB?

- [ ] Nessuna delle altre risposte proposte è corretta
- [x] Consente di creare un vettore riga di estremi aa e b, costituito da N punti equispaziati.
- [ ] Consente di creare un matrice quadrata di ordine N con elementi compresi tra a e b.
- [ ] Consente di creare uno spazio lineare costituito da N vettori con valori compresi tra a e b.

Lezione 032

01. Cosa consente di calcolare la funzione elementare eig(A)?

- [x] Gli autovalori della matrice A.
- [ ] Il polinomio caratteristico della matrice A.
- [ ] Nessuna delle altre risposte proposte è corretta
- [ ] Le dimensioni (eigen) della matrice A.

02. Quale delle seguenti è corretta con riferimento agli operatori .*, ./ e .^ in MATLAB?

- [x] Effettuano rispettivamente le operazioni di moltiplicazione, divisione ed elevamento a potenza sui singoli elementi matrici coinvolte.
- [ ] Effettuano rispettivamente le operazioni di divisione, moltiplicazione ed elevamento a potenza di matrici.
- [ ] Nessuna delle altre risposte proposte è corretta
- [ ] Effettuano rispettivamente le operazioni di divisione, moltiplicazione ed elevamento a potenza sui singoli elementi matrici coinvolte.

03. Quali delle seguenti funzioni consentono rispettivamente di ottenere gli zeri di un polinomio e di valutare il valore di un polinomio in un punto?

- [x] roots(pol); polyval(pol, punto)
- [ ] poly(pol); evaluate(punto, pol)
- [ ] eig(pol); polyval(pol, punto)
- [ ] Nessuna delle altre risposte proposte è corretta

Lezione 033

01. Cosa si intende per modello a scatola nera, a scatola grigia, o completo di un sistema?

- [x] Diversi gradi di dettaglio nella derivazione del modello del processo.
- [ ] Diverse tecniche realizzative di un modello in scala.
- [ ] Rispettivamente, modelli di tipo quantitativo, qualitativo o comportamanetale.
- [ ] Nessuna delle altre risposte proposte è corretta

02. Si riporti una metodologia (proposta nel corso) di definizio del modello matematico di un sistema.

Metodologia di definizione dei modelli matematici dei sistemi

Per modellizzare un sistema da controllare è necessario:

1. Definire il sistema in termini di elementi ed interazioni che siano determinanti ai fini degli obiettivi che il sistema deve raggiungere. Gli elementi sono caratterizzati dall'energia che accumulano, dissipano, trasformano o trasmettono ad altri elementi;
2. Definire le varibili del sistema (di ingresso, di uscita, disturbi, di stato);
3. Formulare un modello matematico basato sulla comprensione del comportamento dinamico del sistema e risultante in un sistema di equazioni differenziali che regolano il comportamento dinamico del sistema;
4. Introdurre delle ipotesi semplificative al fine di semplificare (linearizzare) il modello matematico e renderne semplice la sua implementazione con software specialistico;
5. Risolvere le equazioni differenziali per le variabili di uscita, a partire da ipotesi specifiche sui disturbi, sulle variabili di ingresso e sulle variabili di stato;
6. Verificare la correttezza delle soluzioni ottenute al fine di validare il modello;
7. Se necessario, ripetere l'analisi del sistema fino a quando il modello è validato.

Lezione 034

01. Quale delle seguenti è corretta con riferimento al modello matematico quantitativo di un sistema?

☐ Le variabili di stato coincidono sempre con le grandezze misurate in uscita.

☐ Nessuna delle altre risposte proposte è corretta

☐ Le equazioni differenziali descrivono il comportamento statico del sistema fisico.

■ Esso mette le variabili di uscita in relazione con le variabili di ingresso, con i disturbi e con le variabili di stato attraverso opportune equazioni differenziali.

02. Quale delle seguenti affermazioni è corretta con riferimento alla linearizzazione di un sistema?

☐ Nessuna delle altre risposte proposte è corretta

☐ Il sistema y(t) = m*x(t) + b non ha bisogno di linearizzazione perché è già lineare.

☐ Un sistema linearizzato e il corrispondente sistema nonlineare originale sono del tutto equivalenti.

■ E' necessario fissare un punto di lavoro e una tolleranza massima. Quando il sistema si trova a funzionare oltre i limiti di tolleranza, bisogna calcolare un nuovo sistema lineare centrato in un nuovo punto di lavoro.

03. Quali sono i limiti principali della linearizzazione?

☐ Semplifica l'analisi del sistema consentendo di sfruttare i risultati classici della teoria dei sistemi lineari.

☐ Nessuna delle altre risposte proposte è corretta

☐ A seconda del punto di lavoro, si può sempre ricorrere ad un sistema linearizzato su cui applicare le leggi di controllo più opportune.

■ Solo alcuni sistemi nonlineari possono essere linearizzati; nel caso in cui i valori nominali di funzionamento del sistema prevedano un intorno molto ampio rispetto al punto di lavoro è necessario analizzare il sistema nonlineare approssimandolo linearmente punto per punto.

04. Quali sono le condizioni necessarie che deve soddisfare un sistema per essere lineare?

■ Principio di sovrapposizione degli effetti e proprietà di omogeneità.

☐ Nessuna delle altre risposte proposte è corretta

☐ Controllabilità e osservabilità.

☐ Linearizzabilità e proprietà di omogeneità.

05. Quale delle seguenti è corretta con riferimento ad un condensatore elettrico in parallelo ad una resistenza elettrica e ad una induttanza?

■ La differenza di potenziale ai capi del condensatore oscilla nel tempo con smorzamento esponenziale assestandosi al valore asintotico nullo.

☐ Le spire dell'induttanza causano una dissipazione dell'energia esponenziale.

☐ Nessuna delle altre risposte proposte è corretta

☐ La resistenza consente l'accumulo dell'energia elettrica nelle armature del condensatore.

06. Quali sono in genere le uscite da controllare in sistemi, rispettivamente, 1) elettrici, 2) meccanici a traslazione, 3) meccanici a rotazione, 4) a fluido, 5) termici?

☐ Nessuna delle altre risposte proposte è corretta

■ 1) tensione, 2) velocità, 3) velocità angolare, 4) pressione, 5) temperatura.

☐ 1) tensione, 2) pressione, 3) velocità angolare, 4) portata, 5) temperatura.

☐ 1) corrente, 2) accelerazione angolare, 3) posizione, 4) pressione, 5) temperatura.

07. Quale delle seguenti è corretta con riferimento ad un condensatore visto come elemento elettrico di accumulo di energia?

☐ In un condensatore, applicando una differenza di potenziale costante ai suoi capi, la corrente cresce nel tempo con andamento lineare. Questo comportamento dinamico è detto derivatore.

☐ Nessuna delle altre risposte proposte è corretta

■ In un condensatore, facendo fluire una corrente costante in ingresso, la differenza di potenziale ai suoi capi cresce nel tempo con andamento lineare. Questo comportamento dinamico è detto integratore.

☐ Un condensatore sottoposto ad una differenza di potenziale accumula corrente tra le armature.

08. Quale delle seguenti è corretta con riferimento ad un condensatore elettrico in parallelo ad una resistenza elettrica?

☐ Facendo fluire una corrente costante in ingresso, la differenza di potenziale ai capi del condensatore cresce nel tempo con andamento lineare.

☐ Nessuna delle altre risposte proposte è corretta

☐ Il calore presente sulla resistenza si trasforma in energia elettrica, che si accumula così sulle armature del condensatore.

■ Un parallelo resistenza-condensatore sottoposto ad una corrente continua accumula carica elettrica e quindi energia elettrica nelle proprie armature e nello stesso tempo dissipa l'energia elettrica sulla resistenza. Questo comportamento dinamico è detto esponenziale.

09. Enunciare i pro e i contro della linearizzazione.

Pro e contro della linearizzazione

Linearizzare un sistema non lineare ha l'indubbio vantaggio di semplificare l'analisi del sistema, potendo sfruttare tutte le proprietà e i risultati teorici derivati per i sistemi lineari.

Attraverso la linerarizzazione si può controllare un sistema nell'intorno del punto di lavoro prescelto e, qualora alcuni parametri dinamici cambino nel tempo, oppure cambi il punto di lavoro, si può sempre ricorrere ad un nuovo sistema linearizzato su cui applicare, in base alla conseguente analisi, le leggi di controllo più opportune.

Il limite principale della linearizzazione consiste proprio nel suo limite di validità. Solo alcuni sistemi non lineari possono essere linearizzati (la funzione che lega ingresso ed uscita deve essere continua e derivabile). Inoltre nel caso in cui i valori nominali di funzionamento del sistema contemplino un intorno molto ampio rispetto al punto di lavoro, tale da vanificare la validità del sistema linearizzato nell'intorno del punto di lavoro, è necessario condurre un'analisi accurata su più sistemi lineari che approssimino, punto per punto, il sistema non lineare. E, conseguentemente, anche le leggi di controllo da applicare dovranno tenere conto di tale comportamento ed essere robuste rispetto a tutti i cambiamenti prevedibili delle condizioni operative.

Lezione 035

01. Qual è la differenza tra evoluzione libera ed evoluzione forzata?

☐ Nessuna delle altre risposte proposte è corretta

■ L'evoluzione libera di un sistema dipende dallo stato iniziale del sistema ed evolve indipendentemente dal segnale di ingresso. L'evoluzione forzata dipende invece dal segnale di ingresso.

☐ L'evoluzione libera di un sistema dipende dal segnale di ingresso ed evolve indipendentemente dallo stato iniziale. L'evoluzione forzata dipende invece dallo stato iniziale.

☐ L'evoluzione libera di un sistema è indipendente da forze esterne. L'evoluzione forzata può essere invece condizionata da forze esterne.

02. Perché è utile passare dal dominio del tempo t al dominio della variabile complessa s?

☐ Perché attraverso la trasformata di Laplace, la risoluzione di equazioni lineari algebriche viene semplificata conducendo alla risoluzione di equazioni differenziali.

☐ Perché un sistema fisico è un sistema causale.

☐ Nessuna delle altre risposte proposte è corretta

■ Perché attraverso la trasformata di Laplace, la risoluzione di equazioni differenziali viene semplificata conducendo alla risoluzione di equazioni lineari algebriche.

03. Quale dei seguenti strumenti matematici consente di passare dal dominio della variabile complessa s al dominio del tempo t?

☐ Nessuna delle altre risposte proposte è corretta

☐ La trasformata di Laplace.

■ La trasformata inversa di Laplace.

☐ La trasformata Z.

04. Quale delle seguenti esprime le proprietà fondamentali della trasformata di Laplace?

☐ Nessuna delle altre risposte proposte è corretta

☐ La trasformata di Laplace gode della proprietà di omogeneità.

☐ La trasformata di Laplace soddisfa il principio di sovrapposizione degli effetti.

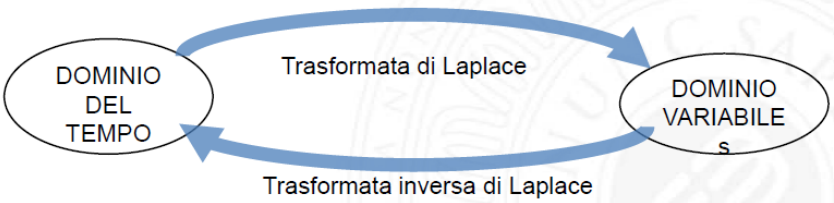
■ La trasformata di Laplace è invariante rispetto alla somma e al prodotto scalare.

05. Riportare la formula matematica della trasformata di Laplace e della trasformata inversa di Laplace.

Trasformata di Laplace

Gli strumento matematici che permettono di passare in maniera reversibile dal dominio del tempo (t) al dominio della variabile complessa s, e viceversa sono la **trasformata di Laplace** e la **trasformata inversa di Laplace**.

$$F(s) = L\{f(t)\} = \int_{0^-}^{\infty} f(t)e^{-st}dt$$



$$f(t) = L^{-1}\{F(s)\} = \frac{1}{2\pi j}\int_{s-j\infty}^{s+j\infty} F(s)e^{st}ds$$

Lezione 036

01. Qual è la corretta espressione della funzione di trasferimento ad anello chiuso assumendo che Gc(s), Ga(s), G(s) e H(s) siano rispettivamente le funzioni di trasferimento di controllore, attuatore, processo e sensore?

- [x] W(s) = Y(s)/R(s) = (G(s)Ga(s)Gc(s))/(1+G(s)Ga(s)Gc(s)H(s))
- [ ] W(s) = Y(s)/E(s) = 1/(1+G(s)Ga(s)Gc(s)H(s))
- [ ] Nessuna delle altre risposte proposte è corretta
- [ ] W(s) = U(s)/R(s) = (Ga(s)Gc(s))(1+G(s)Ga(s)Gc(s)H(s))

02. Dato uno schema a blocchi in cui due blocchi con funzioni di trasferimento G1(s) e G2(s) sono disposti in serie, qual è la funzione di trasferimento del blocco serie complessivo?

- [ ] Il sistema serie equivalente ha funzione di trasferimento G1(s)/G2(s).
- [ ] Il sistema serie equivalente ha funzione di trasferimento G1(s) + G2(s).
- [x] Il sistema serie equivalente ha funzione di trasferimento G1(s)*G2(s).
- [ ] Nessuna delle altre risposte proposte è corretta

03. Qual è la definizione di funzione di trasferimento di un sistema lineare?

- [ ] E' il rapporto tra la trasformata di Laplace della variabile di ingresso e la trasformata di Laplace della variabile di uscita, con tutte le condizioni iniziali poste a zero.
- [x] E' il rapporto tra la trasformata di Laplace della variabile di uscita e la trasformata di Laplace della variabile di ingresso, con tutte le condizioni iniziali poste a zero.
- [ ] Nessuna delle altre risposte proposte è corretta
- [ ] E' il rapporto tra la trasformata di Laplace della variabile di errore e la trasformata di Laplace della variabile di uscita, con tutte le condizioni iniziali poste a zero.

04. Quale delle seguenti affermazioni è corretta con riferimento al passaggio dal dominio s al dominio del tempo t?

- [ ] Non sempre è possibile distinguere tra risposta transitoria e risposta a regime.
- [ ] Nessuna delle altre risposte proposte è corretta
- [x] Una volta calcolata la Y(s), si possono distinguere tre contributi che, antitrasformati, rappresentano rispettivamente la risposta transitoria in evoluzione libera, la risposta transitoria in evoluzione forzata e la risposta a regime in evoluzione forzata.
- [ ] Attraverso il calcolo dei residui si risale solo ed esclusivamente alla risposta a regime in evoluzione forzata.

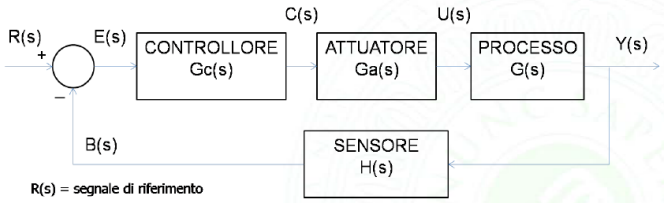
05. Quale delle seguenti è corretta con riferimento al comportamento dinamico a regime transitorio e a regime permanente?

- [ ] Il primo si calcola applicando il teorema del valore finale alla Y(s), il secondo si calcola sviluppando in frazioni parziali la Y(s).
- [x] Il primo si calcola sviluppando in frazioni parziali la Y(s) e antitrasformando, il secondo si calcola applicando il teorema del valore finale alla Y(s).
- [ ] La trasformata di Laplace non consente di distinguere tra i due.
- [ ] Nessuna delle altre risposte proposte è corretta

06. Mediante l'ausilio di uno schema a blocchi, si illustri la procedura di calcolo della funzione di trasferimento di un sistema ad anello chiuso.

Funzione di trasferimento ad anello chiuso

Prendiamo in considerazione una modalità di controllo a catena chiusa. Anche in questo caso si può rappresentare il sistema come il seguente schema a blocchi:



R(s) = segnale di riferimento
E(s) = segnale di errore
C(s) = segnale di comando
U(s) = segnale di forzamento
Y(s) = segnale di uscita (insegue il segnale di riferimento)
B(s) = segnale di misura dell'uscita

Calcoliamo la funzione di trasferimento di questo sistema, ovvero il rapporto tra R(S) e Y(s), detta **funzione di trasferimento ad anello chiuso**.
Le funzioni di trasferimento poste in serie nel ramo diretto implicano che:

$$Y(s) = G_c(s)G_a(s)G(s)E(s)$$

Il sommatore permette di derivare l'espressione della E(s):

$$E(s) = R(s) - B(s) = R(s) - H(s)Y(s)$$

Sostituendo il tutto nell'equazione precedente:

$$Y(s) = G(s)G_a(s)G_c(s)[R(s) - H(S)Y(s)] \rightarrow$$
$$Y(s)[1 + G(s)G_a(s)G_c(s)H(S)] = G(s)G_a(s)G_c(s)R(s) \rightarrow$$
$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{G(s)G_a(s)G_c(s)}{1 + G(s)G_a(s)G_c(s)H(S)}$$

La **funzione di trasferimento ad anello chiuso** assume grande importanza nei controlli automatici dei sistemi in quanto descrive il comportamento dinamico delle modalità di controllo a catena chiusa e a retroazione, che rappresenta uno degli strumenti più efficaci per ottenere le funzionalità, le specifiche e le prestazioni richieste al sistema da controllare.

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{G(s)G_a(s)G_c(s)}{1 + G(s)G_a(s)G_c(s)H(S)}$$

Dato pertanto un sistema da controllare G(s), scelte le modalità di intervento in termini di attuatori Ga(s) e sensori H(s), l'obiettivo dell'ingegnere dell'automazione sarà quello di scegliere una opportuna legge di controllo Gc(s) tale che la funzione di trasferimento complessiva ad anello chiuso garantisca la funzionalità (ovvero l'inseguimento da parte del segnale di uscita Y(s) del segnale di riferimento R(s)), le specifiche e le prestazioni richieste al sistema controllato.

© 2016 Università Telematica eCampus - Data Stampa 14/12/2016 15:06:38 - 44/108

Lezione 037

01. Quale delle seguenti esprime correttamente la Y(s) in funzione del guadagno di anello L(s) in un sistema di controllo a controreazione, essendo R(s), T(s) e N(s) le trasformate di Laplace dei segnali di riferimento, di disturbo e di errore di misura?

- [ ] Y(s) = (1/(1+L(s)))*R(s) + (1/(1+L(s)))*T(s) - (1/(1+L(s)))*N(s)
- [ ] Y(s) = (L(s)/(1+L(s)))*T(s) + (G(s)/(1+L(s)))*N(s) - (L(s)/(1+L(s)))*R(s)
- [x] Y(s) = (L(s)/(1+L(s)))*R(s) + (G(s)/(1+L(s)))*T(s) - (L(s)/(1+L(s)))*N(s)
- [ ] Nessuna delle altre risposte proposte è corretta

02. In un sistema di controllo a controreazione, quale delle seguenti esprime correttamente la E(s) in funzione del guadagno di anello L(s) e delle trasformate di Laplace R(s), T(s) e N(s) rispettivamente dei segnali di riferimento, di disturbo e di errore di misura?

- [ ] Nessuna delle altre risposte proposte è corretta
- [x] E(s) = (1/(1+L(s)))*R(s) - (G(s)/(1+L(s)))*T(s) + (L(s)/(1+L(s)))*N(s)
- [ ] E(s) = (L(s)/(1+L(s)))*R(s) + (G(s)/(1+L(s)))*T(s) - (L(s)/(1+L(s)))*N(s)
- [ ] E(s) = (1/(1+L(s)))*T(s) - (G(s)/(1+L(s)))*N(s) + (L(s)/(1+L(s)))*R(s)

03. Quale effetto produce la presenza di disturbi ed errori di misura?

- [ ] Eventuali disturbi in ingresso al processo alterano l'informazione proveniente dal sistema da controllare falsando così il valore reale dell'uscita; gli errori di misura immettono energia nel sistema in maniera non controllabile causandone una evoluzione non voluta.
- [ ] Nessuna delle altre risposte proposte è corretta
- [x] Eventuali disturbi in ingresso al processo immettono energia nel sistema in maniera non controllabile causandone una evoluzione non voluta; gli errori di misura alterano l'informazione proveniente dal sistema da controllare falsando così il valore reale dell'uscita.
- [ ] Disturbi ed errori di misura sono difficilmente gestibili mediante una modalità di controllo a controreazione.

04. Per quale delle seguenti è opportuno ricorrere ad un intervento di controllo basato su feedback?

- [x] La presenza di disturbi, dinamiche di reazione estremamente veloci, un corretto dimensionamento dell'impianto rispetto alle specifiche e alle prestazioni, cambiamenti nei parametri dinamici del sistema.
- [ ] Il processo evolve molto lentamente, con dinamiche transitorie molto attenuate.
- [ ] Una minima sensibilità alle variazioni dei parametri del sistema da controllare.
- [ ] Nessuna delle altre risposte proposte è corretta

05. Quale delle seguenti descrive correttamente la modalità di controllo a catena chiusa e a controreazione?

- [ ] Nessuna delle altre risposte proposte è corretta
- [ ] Il feedback viene sommato al segnale di riferimento (retroazione positiva) per produrre un'azione di controllo tale da portare il sistema controllato a restituire le prestazioni desiderate.
- [x] La misura di un feedback consente il confronto di un'informazione di ritorno da parte del sistema controllato con il valore del segnale di riferimento, il calcolo dell'errore attualmente esistente tra andamento desiderato e andamento reale e la produzione di un'azione di controllo finalizzata a ridurre tale errore.
- [ ] L'uscita viene generata direttamente in risposta ad un segnale di ingresso senza necessità di retroazione.

06. Cos'è una modalità di controllo a catena aperta?

- [ ] E' una modalità di controllo che non prevede un feedback sull'andamento della variabile controllata. chatgpt e io
- [x] Nessuna delle altre risposte proposte è corretta
- [ ] E' una modalità di controllo in cui i disturbi impattano sulla catena di controllo (che risulta quindi "aperta", o permeabile, rispetto ad essi).
- [ ] E' una modalità a controreazione in cui le misure della variabile controllata sono intermittenti.

07. La modalità di controllo a catena aperta può garantire sempre le prestazioni desiderate?

- [ ] Sempre
- [x] No, non sempre.
- [ ] Sempre nel caso di sistemi lineari.
- [ ] Nessuna delle altre risposte proposte è corretta

08. Quale delle seguenti affermazioni è corretta con riferimento ad un sistema di controllo ad anello aperto?

☐ Nessuna delle altre risposte proposte è corretta

☐ Un sistema ad anello aperto usa la misura del segnale di uscita e un confronto con l'uscita desiderata per generare un segnale di errore che è usato dal controllore per alimentare il processo.

■ Un sistema ad anello aperto opera senza retroazione e genera direttamente l'uscita in risposta al segnale di ingresso.

☐ Un sistema ad anello aperto sfrutta comunque la retroazione per conseguire una migliore riduzione degli errori sulla risposta a regime.

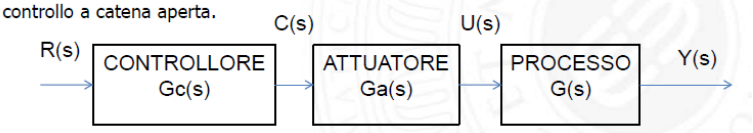
09. Commentare la differenza tra la modalità di controllo a catena aperta e la modalità di controllo a catena chiusa e a controreazione.

Modalità di controllo a catena aperta

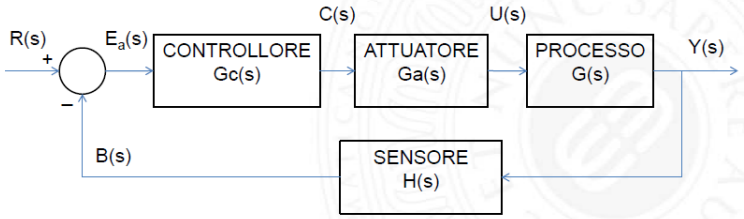
Nelle modalità di controllo ad anello aperto il sistema da controllare (detto anche processo) è pilotato da un controllore, il quale, attraverso un attuatore, impone opportune azioni di forzamento, fornendo (o togliendo) energia al sistema da controllare al fine di causarne una evoluzione forzata Y(s).

Nel caso dei problemi di controllo, in cui il segnale di uscita del sistema controllato Y(s) deve assumere valori analoghi al segnale di riferimento in ingresso R(s), una modalità di controllo a catena aperta può essere adottata, purché le specifiche e le prestazioni di progetto siano adeguate a quelle raggiungibili con tale modalità di controllo.

Un processo che evolve molto lentamente, con dinamiche transitorie molto attenuate, può essere controllato attraverso questa modalità di controllo. Ad esempio il controllo del livello di un bacino idrico alimentato da portate in ingresso ed uscita piccole rispetto al dimensionamento dal sistema da controllare, può essere demandato ad una modalità di controllo a catena aperta.



La presenza di disturbi, le dinamiche di reazione estremamente veloci, un corretto dimensionamento dell'impianto rispetto alle specifiche e alle prestazioni, cambiamenti nei parametri dinamici del sistema, comportano la necessità di avere un feedback, ovvero una informazione di ritorno da parte del sistema controllato e paragonarla con il valore attuale del segnale di riferimento al fine di verificare l'entità dell'errore attualmente esistente tra andamento desiderato (R(s)) e andamento reale del sistema controllato (Y(s)).



Lezione 038

01. Quanto vale l'errore a regime ad anello aperto rispetto ad un segnale di ingresso a gradino unitario?

☐ 1 - L(1), con L(s) il guadagno di anello.

■ 1 - L(0), con L(s) il guadagno di anello.

☐ Sempre 0.

☐ Nessuna delle altre risposte proposte è corretta

02. Qual è la definizione corretta di errore a regime rispetto ad un segnale di ingresso di riferimento?

■ E' lo scostamento tra segnale di riferimento e segnale di uscita dopo che la risposta transitoria si è esaurita.

☐ Nessuna delle altre risposte proposte è corretta

☐ E' lo scostamento tra azione di controllo e segnale di riferimento durante il transitorio.

☐ E' lo scostamento tra il segnale di uscita e il feedback dopo che la risposta transitoria si è esaurita.

03. Quale delle seguenti affermazioni è corretta con riferimento alla risposta in transitorio?

☐ Il comportamento transitorio di un sistema non dipende dalla funzione di trasferimento del sistema stesso.

■ Il comportamento transitorio è controllabile fintanto che si riescono a modificare opportunamente i parametri dinamici associati al denominatore della funzione di trasferimento.

☐ Il comportamento transitorio è controllabile fintanto che si riescono a modificare opportunamente i parametri dinamici associati al numeratore della funzione di trasferimento.

☐ Nessuna delle altre risposte proposte è corretta

04. Qual è la corretta definizione di sensitività di un sistema?

☐ La sensitività di un sistema è il rapporto tra la variazione relativa della funzione di trasferimento del sensore e la variazione relativa della funzione di trasferimento del sistema da controllare, o di un suo parametro, per variazioni piccole (al limite infinitesime).

■ La sensitività di un sistema è il rapporto tra la variazione relativa della funzione di trasferimento del sistema controllato e la variazione relativa della funzione di trasferimento del sistema da controllare, o di un suo parametro, per variazioni piccole (al limite infinitesime).

☐ Nessuna delle altre risposte proposte è corretta

☐ La sensitività di un sistema è il rapporto tra la variazione relativa della funzione di trasferimento dell'attuatore e la variazione relativa della funzione di trasferimento del sistema da controllare, o di un suo parametro, per variazioni piccole (al limite infinitesime).

05. Quali sono gli svantaggi principali associabili all'uso della controreazione?

☐ Nessuna delle altre risposte proposte è corretta

■ 1) Aumento della complessità del sistema di controllo; 2) perdita di guadagno del sistema controllato; 3) il fatto che, anche se il sistema ad anello aperto è stabile, il sistema ad anello chiuso può risultare instabile.

☐ 1) Aumento della complessità del sistema di controllo; 2) aumento di guadagno del sistema controllato.

☐ 1) Aumento di guadagno del sistema controllato; 2) il fatto che, anche se il sistema ad anello aperto è stabile, il sistema ad anello chiuso può risultare instabile.

06. Quale delle seguenti affermazioni è corretta con riferimento alla sensitività di un sistema a catena chiusa?

☐ S(s) = 1/(1+L(s)); la sensitività del sistema controllato a variazioni infinitesime del sistema da controllare può essere diminuita diminuendo il valore del guadagno di anello nelle frequenze di utilizzo del sistema.

☐ Nessuna delle altre risposte proposte è corretta

☐ S(s) = L(s)/(1+L(s)); la sensitività del sistema controllato a variazioni infinitesime del sistema da controllare può essere aumentata aumentando il valore del guadagno di anello nelle frequenze di utilizzo del sistema.

■ S(s) = 1/(1+L(s)); la sensitività del sistema controllato a variazioni infinitesime del sistema da controllare può essere diminuita aumentando il valore del guadagno di anello nelle frequenze di utilizzo del sistema.

07. Quale delle seguenti affermazioni è corretta con riferimento alla sensitività di un sistema ad anello aperto?

☐ Anche nei sistemi ad anello aperto la sensitività vale S(s) = 1/(1+L(s)).

■ La sensitività non può essere modificata, ma è costante e pari a 1.

☐ Nessuna delle altre risposte proposte è corretta

☐ La sensitività non può essere modificata, ma è costante e pari a 0.

08. Quale delle seguenti affermazioni è corretta con riferimento alla reiezione dei disturbi?

☐ Azzerando R(s) e N(s) senza perdita di generalità, E(s) = L(s)/(1+G(s))*T(s).

☐ Per ottenere la reiezione di un disturbo in un sistema di controllo a controreazione, è necessario che il guadagno di anello assuma valori molto bassi alle frequenze caratteristiche del segnale di disturbo T(s).

■ Per ottenere la reiezione di un disturbo in un sistema di controllo a controreazione, è necessario che il guadagno di anello assuma valori molto elevati alle frequenze caratteristiche del segnale di disturbo T(s).

☐ Nessuna delle altre risposte proposte è corretta

09. Quanto vale l'errore a regime ad anello chiuso rispetto ad un segnale di ingresso a gradino unitario?

☐ Sempre 1.

☐ 1/(1-L(1)), con L(s) il guadagno di anello.

■ 1/(1-L(0)), con L(s) il guadagno di anello.

☐ Nessuna delle altre risposte proposte è corretta

10. Illustrare brevemente vantaggi e costi della controreazione.

- Vantaggi della controreazione:
  - Sensitività dei sistemi in catena aperta e controreazione
  - Reiezione dei disturbi
  - Attenuazione dei rumori di misura
  - Controllo della risposta in transitorio
  - Errore a regime

Costo della controreazione

I vantaggi inequivocabili dei sistemi a controreazione sono bilanciati da alcuni svantaggi che è sempre conveniente considerare in fase di progettazione.

Gli svantaggi principali dell'uso della controreazione sono:

- **Aumento della complessità** del sistema di controllo. In particolare il componente più importante è il sensore, la cui scelta influenza moltissimo la qualità delle prestazioni ottenibili. I sensori introducono rumore di misura e devono essere precisi, il loro costo incide sensibilmente sul costo del sistema di controllo.
- **Perdita di guadagno** del sistema controllato. Infatti nella catena aperta il guadagno di anello è G_cG, mentre in catena chiusa esso è ridotto a $G_cG / (1 + G_cG)$. Quindi il guadagno ad anello chiuso è ridotto di un fattore pari ad $1 / (1 + G_cG)$, ovvero la sensibilità del sistema ad anello chiuso. Questo significa che al fine di ottenere lo stesso guadagno del controllo a catena aperta (ma con in più tutti i vantaggi descritti) è necessario avere un guadagno di anello maggiore. Tale margine di guadagno in genere è garantito dai componenti che erogano potenza al sistema (amplificatori e attuatori).
- Anche se il sistema ad anello aperto è stabile, il sistema ad anello chiuso può essere **instabile**. Ciò è dovuto al fatto che la controreazione alimenta il sistema con un feedback che può introdurre modi naturali instabili, tali per cui ad un ingresso limitato in ampiezza corrisponde una uscita illimitata in ampiezza.

Sensitività dei sistemi

La sensitività di un sistema è il rapporto tra la variazione relativa della funzione di trasferimento del sistema controllato e la variazione relativa della funzione di trasferimento del sistema da controllare, o di un suo parametro, per variazioni piccole (al limite infinitesime).

Sensitività dei sistemi ad anello aperto

Nei sistemi a catena aperta, considerando nulli disturbi ed errore di misura, sappiamo che la funzione di trasferimento del sistema controllato è:

$$T(s)=\frac{Y(s)}{R(s)}=L(s)=G_c(s)G(s)$$

Consideriamo quindi la sensitività del sistema rispetto a cambiamenti infinitesimi di G(s):

$$S=\frac{\partial T}{\partial G}\frac{G}{T}=G_c\frac{G}{G_cG}=1$$

Pertanto nei sistemi ad anello aperto la sensitività non può essere modificata a piacimento, ma è costante e pari ad 1. Ogni variazione del modello rispetto alla realtà, quindi, comporta necessariamente una variazione nel comportamento ingresso/uscita del sistema controllato.

Reiezione dei disturbi

Nei sistemi ad anello aperto la presenza di un disturbo non può essere attenuata in alcuna maniera, quindi l'uscita è necessariamente alterata dalla presenza di un disturbo con il risultato che il sistema controllato nel suo complesso è impreciso.

Un vantaggio fondamentale dei sistemi di controllo a controreazione è proprio quello di poter naturalmente attenuare o annullare gli effetti dei disturbi. Per il principio di sovrapposizione degli effetti senza perdita di generalità possiamo considerare nulli ingresso ed errore di misura, R(s)=N(s)=0. Il segnale di errore sarà pertanto:

$$E(s)=-\frac{G(s)}{1+L(s)}T(s)$$

Attenuazione dei rumori di misura

Nei sistemi ad anello aperto non viene effettuata alcuna misura, quindi questo problema affligge solo i sistemi a controreazione. Ma analogamente a quanto visto per i disturbi, si consideri il segnale di errore quando il riferimento e i disturbi siano nulli R(s)=T(s)=0.

Il segnale di errore sarà pertanto:

$$E(s)=\frac{L(s)}{1+L(s)}N(s)$$

Errore a regime ad anello aperto

Nel caso di un sistema ad anello aperto, privo di errore di misura (N(s) = 0) e di disturbi (T(s) = 0) dato un segnale di ingresso generico G(s), la forma dell'errore a regime è:

$$e_o(\infty)=\lim_{t\to\infty}e(t)=\lim_{s\to0}sE(s)=\lim_{s\to0}s(1-L(s))R(s)$$

Se prendiamo in considerazione un segnale di ingresso a gradino unitario, allora l'errore a regime sarà:

$$e_o(\infty)=\lim_{s\to0}s(1-L(s))R(s)=\lim_{s\to0}s(1-L(s))\frac{1}{s}=1-L(0)$$

Risposta in transitorio

Nei sistemi ad anello aperto se un sistema non garantisce una risposta soddisfacente nel regime transitorio, nulla si può fare, se non sostituire il sistema da controllare oppure cambiare la modalità di controllo e passare alla controreazione.

Per capire il motivo di tale ragionamento, bisogna analizzare il guadagno di anello L(s). Nei sistemi ad anello aperto la funzione di trasferimento è proprio il guadagno di anello. Il regime transitorio sappiamo dipendere dalle radici del denominatore della funzione di trasferimento che nel caso del sistema ad anello aperto è:

$$\frac{Y(s)}{R(s)}=L(s)=G_c(s)G(s)=\frac{n_{G_c}(s)}{d_{G_c}(s)}\frac{n_G(s)}{d_G(s)}$$

Lezione 039

01. Come si definiscono i segnali di ingresso canonici?

[x] Sono quella classe di segnali di ingresso cui corrisponde un segnale di uscita avente, a regime permanente, un andamento analogo a quello del segnale di ingresso.

[ ] Sono quella classe di segnali di ingresso cui corrisponde un segnale di uscita avente, a regime transitorio, un andamento analogo a quello del segnale di ingresso.

[ ] Sono quella classe di segnali di ingresso cui corrisponde un segnale di uscita avente, a regime permanente, un andamento totalmente diverso da quello del segnale di ingresso.

[ ] Nessuna delle altre risposte proposte è corretta

02. Quale delle seguenti affermazioni è corretta con riferimento alla definizione di specifiche e prestazioni di un sistema di controllo?

[x] Specifiche e prestazioni sono determinate con riferimento alla risposta in transitorio e alla risposta a regime per una determinata classe di segnali di ingresso.

[ ] Nessuna delle altre risposte proposte è corretta

[ ] Specifiche e prestazioni sono determinate con riferimento alla risposta in transitorio e alla risposta a regime per una qualsiasi classe di segnali di ingresso.

[ ] Specifiche e prestazioni sono determinate con riferimento alla risposta a regime per una determinata classe di segnali di ingresso. Non si possono imporre prestazioni in termini di risposta in transitorio.

03. Che cosa significa che gli obiettivi che devono essere raggiunti da un sistema di controllo si esprimono in termini di 1) funzionalità, 2) specifiche, e 3) prestazioni?

[ ] 1) (Funzionalità) la risposta transitoria a certi segnali di ingresso deve essere limitata e il costo del sistema di controllo deve essere basso; 2) (specifiche) il sistema controllato deve essere stabile, attenuare i disturbi, e la risposta a regime per certi segnali deve essere sufficientemente precisa; 3) (prestazioni) le variabili di uscita del sistema da controllare devono inseguire delle variabili di riferimento.

[ ] Nessuna delle altre risposte proposte è corretta

[x] 1) (Funzionalità) le variabili di uscita del sistema da controllare devono inseguire delle variabili di riferimento; 2) (specifiche) il sistema controllato deve essere stabile, attenuare i disturbi, e la risposta a regime per certi segnali deve essere sufficientemente precisa; 3) (prestazioni) la risposta transitoria a certi segnali di ingresso deve essere limitata e il costo del sistema di controllo deve essere basso.

[ ] 1) (Funzionalità) il sistema controllato deve essere stabile, attenuare i disturbi, e la risposta a regime per certi segnali deve essere sufficientemente precisa; 2) (specifiche) la risposta transitoria a certi segnali di ingresso deve essere limitata e il costo del sistema di controllo deve essere basso; 3) (prestazioni) le variabili di uscita del sistema da controllare devono inseguire delle variabili di riferimento.

04. Quali sono le trasformate di Laplace di un segnale di ingresso 1) a gradino, 2) a rampa lineare, e 3) a rampa parabolica, tutti con ampiezza pari ad A?

[x] 1) A/s; 2) A/(s^2); 3) 2*A/(s^3).

[ ] 1) 2*A/(s^3); 2) A/(s^2); 3) A/s.

[ ] Nessuna delle altre risposte proposte è corretta

[ ] 1) A; 2) A*t; 3) A*t^2.

05. Quale delle seguenti affermazioni è corretta con riferimento alle relazioni tra poli-zeri e la risposta a gradino?

[x] Lo sviluppo in frazioni parziali della Y(s) dà luogo ad un'espressione nella quale è possibile separare il contributo di poli nell'origine, poli reali e poli complessi coniugati della funzione di trasferimento. La trasformata inversa di questa espressione restituisce la risposta a gradino nel dominio del tempo.

[ ] La posizione dei poli e degli zeri della funzione di trasferimento non è fondamentale per capire se un sistema rispetta o meno le specifiche e le prestazioni date.

[ ] La risposta a gradino è instabile, quindi limitata in ampiezza, se e solo se la parte reale dei poli della funzione di trasferimento è negativa.

[ ] Nessuna delle altre risposte proposte è corretta

06. Qual è la definizione corretta di risposta impulsiva?

[ ] La risposta impulsiva è la rappresentazione nel dominio del tempo della risposta del sistema ad un segnale di ingresso a gradino unitario.

[ ] La risposta impulsiva è la trasformata di Laplace della funzione di trasferimento del sistema.

[x] La risposta impulsiva è la rappresentazione nel dominio del tempo della funzione di trasferimento del sistema.

[ ] Nessuna delle altre risposte proposte è corretta

07. Quali sono le due proprietà fondamentali di cui gode l'impulso?

☐ E' un segnale ad energia infinita. Inoltre, l'integrale di convoluzione dell'impulso con un qualsiasi segnale g(t) restituisce il segnale stesso.

☐ E' un segnale ad energia infinita e soddisfa la proprietà di omogeneità.

☐ Nessuna delle altre risposte proposte è corretta

■ E' un segnale ad energia finita. Inoltre, l'integrale di convoluzione dell'impulso con un qualsiasi segnale g(t) restituisce il segnale stesso.

08. Illustrare e commentare la relazione tra poli-zeri e la risposta a gradino.

Dato che la risposta a gradino di un generico sistema G(s) contiene informazioni sui parametri dinamici, ci si potrebbe chiedere se esiste una qualche relazione tra la risposta a gradino e la funzione di trasferimento, o, meglio ancora, tra la risposta a gradino e i poli e gli zeri della funzione di trasferimento.

Come abbiamo visto, a partire da un qualsiasi sistema fisico, si può descriverne la dinamica nel dominio del tempo attraverso una equazione differenziale lineare a parametri reali. Passando al dominio s, l'equazione differenziale diventa un rapporto di polinomi nel dominio s. Il rapporto tra l'uscita e l'ingresso è la funzione di trasferimento e si presenta nella forma:

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = G(s) = \frac{p_{n-1}s^{n-1} + p_{n-2}s^{n-2} + \ldots + p_0}{q_n s^n + q_{n-1}s^{n-1} + \ldots + q_0} = \frac{p(s)}{q(s)}$$

Ovvero come rapporto di polinomi nella variabile complessa s, con coefficienti reali. Se consideriamo una controreazione unitaria, la funzione di trasferimento ad anello chiuso è:

$$T(s) = \frac{G(s)}{1+G(s)} = \frac{\frac{p(s)}{q(s)}}{1+\frac{p(s)}{q(s)}} = \frac{p(s)}{p(s)+q(s)}$$

Quindi sia ad anello aperto che ad anello chiuso, la funzione di trasferimento è sempre un rapporto di polinomi (con grado del denominatore maggiore o uguale a quello del denominatore).

Consideriamo quindi un segnale di ingresso a gradino unitario, nel dominio s la risposta a gradino, nel caso di sistema a controreazione sarà:

$$Y(s) = \frac{T(s)}{s} = \frac{1}{s}\frac{p(s)}{p(s)+q(s)}$$

La risposta a gradino è quindi data dal rapporto dei due polinomi della funzione di trasferimento, più un polo nell'origine (dovuto al segnale di ingresso a gradino).

Per esprimere la Y(s) nel dominio del tempo, è sufficiente sviluppare la Y(s) in frazioni parziali. Ciò consiste nel trovare le radici del polinomio s[p(s) + q(s)] e poi identificare i residui associati ad ogni radice (o coppie di radici complesse coniugate).

Essendo il polinomio s[p(s)+q(s)] a coefficienti reali, si può dimostrare che detto n il grado del polinomio, esso ammette n radici (ovvero i poli della funzione di trasferimento) che possono essere uno o più poli nulli o reali o una o più coppie di poli complessi coniugati.

Il risultato dello sviluppo in frazioni parziali della Y(s) darà origine ad una espressione del tipo:

$$Y(s) = \frac{1}{s^P} + \sum_{i=1}^{M}\frac{A_i}{s+\sigma_i} + \sum_{k=1}^{N}\frac{B_k s + C_k}{s^2 + 2\alpha_k s + (\alpha_k^2 + \omega_k^2)} \qquad A_i, \sigma_i, \alpha_k \in \Re \quad \omega_k, B_k, C_k \in \Re$$

POLI nell'origine — POLI reali — POLI complessi coniugati

La cui trasformata inversa restituisce la risposta al gradino nel dominio del tempo:

$$y(t) = \frac{t^{P-1}}{(P-1)!} + \sum_{i=1}^{M} A_i e^{-\sigma_i t} + \sum_{k=1}^{N} D_k e^{-\alpha_k t}\sin(\omega_k t + \theta_k)$$

La risposta sarà stabile, e quindi limitata in ampiezza, se e solo se P ≤ 1 e la parte reale dei poli è negativa.

Risulta quindi chiaro come la risposta a gradino dipenda strettamente dai poli della funzione di trasferimento del sistema.

Dato che specifiche e prestazioni di un sistema vengono espresse in funzione della risposta a gradino (nel regime transitorio e a regime permanente), è facile comprendere che la posizione dei poli e degli zeri della funzione di trasferimento è fondamentale per capire se un sistema rispetti o meno le specifiche e le prestazioni date.

Un progettista esperto di sistemi sulla base di un modello matematico accurato del sistema può prevedere gli effetti sulla risposta a gradino (e quindi all'impulso) e aggiungere, cancellare o spostare i poli e gli zeri sul piano complesso fino a quando le specifiche e le prestazioni desiderate saranno soddisfatto. L'aggiunta, la cancellazione e lo spostamento di poli e zeri, ovviamente, è possibile grazie ad una opportuna sintesi del controllore, ovvero della legge di controllo, la cui presenza può modificare la T(s) del sistema controllato.

Il progettista pertanto collocherà i poli affinché i modi ad essi associati soddisfino le specifiche e le prestazioni e collocherà gli zeri in maniera tale da variare opportunamente il peso relativo dei modi associati ai poli.

Lezione 040

01. Quale delle seguenti affermazioni è corretta con riferimento all'influenza dei poli complessi coniugati sulla risposta a gradino?

☐ Nessuna delle altre risposte proposte è corretta

☐ Più i poli sono lontani dall'asse reale, più piccola sarà l'ampiezza delle oscillazioni.

☐ Al crescere della pulsazione naturale, diminuisce la frequenza delle oscillazioni.

■ Al crescere del valore dello smorzamento caratteristico, l'intensità delle oscillazioni diminuisce.

02. Quale delle seguenti affermazioni è corretta con riferimento all'influenza dei poli complessi coniugati sulla risposta a gradino?

☐ Nessuna delle altre risposte proposte è corretta

☐ Il contributo di una coppia di poli complessi coniugati alla risposta a gradino è composto da un termine che rappresenta un'oscillazione smorzata che si annulla nel tempo (parte permanente) e da un termine che rappresenta un'oscillazione smorzata che si assesta nel tempo (parte transitoria).

☐ Il contributo di una coppia di poli complessi coniugati alla risposta a gradino consiste in un termine esponenziale che si assesta in tempo finito su un valore di regime.

■ Il contributo di una coppia di poli complessi coniugati alla risposta a gradino è composto da un termine che rappresenta un'oscillazione smorzata che si annulla nel tempo (parte transitoria) e da un termine che rappresenta un'oscillazione smorzata che si assesta nel tempo (parte permanente).

03. Quale delle seguenti affermazioni è corretta con riferimento all'influenza di una coppia di poli complessi coniugati sulla risposta a gradino?

☐ Nessuna delle altre risposte proposte è corretta

☐ Se la parte reale della coppia di poli complessi coniugati è nulla, si è in condizioni di sovrasmorzamento. Se è maggiore (minore) di 0, si parla di smorzamento critico (sottosmorzamento).

☐ Se la parte reale della coppia di poli complessi coniugati è nulla, si è in condizioni di smorzamento critico. Se è maggiore (minore) di 0, si parla di sovrarisonanza (sottorisonanza).

■ Se la parte reale della coppia di poli complessi coniugati è nulla, si è in condizioni di smorzamento critico. Se è maggiore (minore) di 0, si parla di sovrasmorzamento (sottosmorzamento).

04. Dato un segnale a gradino in ingresso, quale delle seguenti affermazioni è corretta con riferimento all'influenza dei poli della Y(s) sulla risposta a gradino y(t) nel dominio del tempo?

■ I poli nell'origine comportano accumulo di energia ed un comportamento dinamico di integratore. I poli reali comportano accumulo e dissipazione di energia, quindi implicano un comportamento dinamico esponenziale. I poli complessi coniugati comportano trasformazione e dissipazione di energia, quindi implicano un comportamento dinamico oscillatorio.

☐ Nessuna delle altre risposte proposte è corretta

☐ I poli nell'origine comportano accumulo e dissipazione di energia, quindi implicano un comportamento dinamico esponenziale. I poli reali comportano accumulo di energia ed un comportamento dinamico di integratore. I poli complessi coniugati comportano trasformazione e dissipazione di energia, quindi implicano un comportamento dinamico oscillatorio.

☐ I poli nell'origine comportano accumulo e dissipazione di energia, quindi implicano un comportamento dinamico esponenziale. I poli reali comportano trasformazione e dissipazione di energia, quindi implicano un comportamento dinamico oscillatorio. I poli complessi coniugati comportano accumulo di energia ed un comportamento dinamico di integratore.

05. Che cos'è la costante di tempo associata ad un polo reale?

☐ Nessuna delle altre risposte proposte è corretta

■ Dato un termine (s + sigma) a denominatore della Y(s), essa è la quantità 1/sigma, che caratterizza la velocità di assestamento al valore di regime della risposta a gradino esponenziale.

☐ Dato un termine (s + sigma) a numeratore della Y(s), essa è la quantità 1/sigma, che caratterizza la velocità di assestamento al valore di regime della risposta impulsiva di tipo integratore.

☐ Dato un termine (s + sigma) a denominatore della Y(s), essa è la quantità 1/sigma^2, che caratterizza la velocità di assestamento al valore transitorio della risposta a gradino esponenziale.

06. Quale delle seguenti affermazioni è corretta con riferimento alla collocazione nel piano dei poli complessi coniugati della Y(s)?

☐ Maggiore è il fattore di smorzamento, più i poli saranno vicini all'asse immaginario. Minore è lo smorzamento, più i poli saranno lontani dall'asse immaginario ed allineati all'asse reale.

☐ Maggiore è la pulsazione naturale, più i poli saranno vicini (in modulo) all'origine.

☐ Nessuna delle altre risposte proposte è corretta

■ Minore è il fattore di smorzamento, più i poli saranno vicini all'asse immaginario. Maggiore è lo smorzamento, più i poli saranno lontani dall'asse immaginario ed allineati all'asse reale.

07. Qual è il significato fisico dei poli e degli zeri di un sistema?

Abbiamo ben compreso che un sistema lineare è caratterizzato da una funzione di trasferimento esprimibile come rapporto di polinomi a coefficienti reali nella variabile complessa s.

I **poli** determinano il modo in cui l'**energia** immessa nel sistema o sottratta dal sistema attraverso le variabili di ingresso viene accumulata, accumulata e dissipata o trasformata e dissipata nel sistema. Ogni polo infatti ha ad esso associato un modo naturale che partecipa alla dinamica del sistema in evoluzione. Se il segnale di ingresso è di tipo canonico (gradino, rampa lineare, rampa parabolica, etc.) i modi naturali del sistema possono essere osservati all'uscita del sistema e pertanto se ne possono studiare i parametri dinamici.

Gli **zeri** sono invece indice di una relazione differenziale tra la variabile di ingresso e la variabile di uscita. La variabile di uscita dipende pertanto non solo dal valore istantaneo della variabile di ingresso, ma anche dal valore della sua derivata n-esima, dove n è pari al grado del polinomio a numeratore della funzione di trasferimento. Dato che l'azione derivativa è indice di un **forzamento transitorio**, ne conviene che gli zeri della funzione di trasferimento sono indice della presenza, nel sistema, di un forzamento transitorio derivativo additivo al forzamento proporzionale dovuto alla variabile di ingresso.

© 2016 Università Telematica eCampus - Data Stampa 14/12/2016 15:06:41 - 52/108

Lezione 041

01. Quale delle seguenti affermazioni è corretta con riferimento al tipo del sistema?

☐ Nei sistemi a controreazione di tipo N > 0, cioè con N integratori, l'errore a regime rispetto ad un ingresso a gradino è sempre finito ma non nullo.

■ Nei sistemi a controreazione di tipo N, cioè con N integratori, l'errore a regime rispetto ad un ingresso a rampa è infinito se N < 1, finito ma non nullo se N = 1, nullo se N > 1.

☐ Nessuna delle altre risposte proposte è corretta

☐ Nei sistemi a controreazione di tipo N, cioè con N integratori, l'errore a regime rispetto ad un ingresso a rampa è infinito se N > 1, finito ma non nullo se N = 1, nullo se N

02. Qual è la definizione di tempo di assestamento?

■ E' il tempo (in sec) impiegato dalla risposta a gradino per assestarsi permanentemente entro un opportuno intervallo percentuale centrato sul valore di riferimento.

☐ E' il tempo (in sec) impiegato dalla risposta a gradino per salire dal 10% al 90% del valore di riferimento.

☐ Nessuna delle altre risposte proposte è corretta

☐ E' un parametro definito come il rapporto percentuale tra la differenza del picco dal valore di riferimento ed il valore di riferimento stesso.

03. Qual è la definizione corretta del concetto di "tipo" del sistema?

☐ Nessuna delle altre risposte proposte è corretta

☐ Si definisce tipo del sistema, il grado del denominatore della funzione di trasferimento.

☐ Si definisce tipo del sistema, il numero di diverse classi di segnali di ingresso per le quali il sistema dà risposta a regime divergente.

■ Si definisce tipo del sistema il numero intero N di integrazioni presenti nel guadagno di anello.

04. Qual è la definizione di tempo di salita nei sistemi sovrasmorzati (esponenziali)?

☐ Nessuna delle altre risposte proposte è corretta

■ E' il tempo (in sec) impiegato dalla risposta a gradino per salire dal 10% al 90% del valore di riferimento.

☐ E' il tempo (in sec) impiegato dalla risposta a gradino per raggungere per la prima volta il valore di riferimento.

☐ E' il tempo (in sec) impiegato dalla risposta a gradino per raggiungere la massima sovraelongazione (anche noto come tempo al picco).

05. Riportare e commentare la tabella dell'errore a regime dei sistemi di tipo N con ingressi standard.

I risultati finora visti possono essere generalizzati per un qualsiasi tipo di sistema e per qualsiasi ingresso di tipo standard.
Dato un sistema in controreazione, di tipo N, con assenza di disturbi ed errori di misura, allora l'errore a regime per ingressi di tipo standard può essere ricavato dalla seguente tabella:

N integratori nel guadagno di anello L(s)	$r(t)=A$ $R(s)=A/s$	$r(t)=At$ $R(s)=A/s^2$	$r(t)=At^2$ $R(s)=2A/s^3$	$r(t)=At^n$ $R(s)=n!A/s^{n+1}$
0	$e_{ss}=A/1+K_p$	$+\infty$	$+\infty$	$+\infty$
1	$e_{ss}=0$	$e_{ss}=A/K_v$	$+\infty$	$+\infty$
2	$e_{ss}=0$	$e_{ss}=0$	$e_{ss}=2A/K_a$	$+\infty$
n	$e_{ss}=0$	$e_{ss}=0$	$e_{ss}=0$	$e_{ss}=n!A/K_n$ $K_n=\lim_{s\to 0} s^n L(s)$

Nei sistemi a controreazione di tipo 0, ovvero senza integratori, ovvero con N=0, l'errore a regime con ingresso a gradino diviene:

$$e_{ss}=\lim_{t\to\infty} e(t)=\lim_{s\to 0} sE(s)=\lim_{s\to 0}\frac{s\dfrac{A}{s}}{1+L(s)}=\frac{A}{1+K_p}$$

Nei sistemi a controreazione di tipo N>0, ovvero con N integratori, l'errore a regime con ingresso a gradino è nullo, infatti:

Nei sistemi a controreazione di tipo N, ovvero con N integratori, l'errore a regime con ingresso a rampa diviene:

$$e_{ss}=\lim_{t\to\infty} e(t)=\lim_{s\to 0} sE(s)=\lim_{s\to 0}\frac{s\,A/s^2}{1+L(s)}=$$

$$=\lim_{s\to 0}\frac{A/s}{1+K\prod_{i=1}^{M}(z_i)\Big/ s^N\prod_{k=1}^{Q}(p_k)}=\lim_{s\to 0}\frac{As^{N-1}\prod_{k=1}^{Q}(p_k)}{s^N\prod_{k=1}^{Q}(p_k)+K\prod_{i=1}^{M}(z_i)}$$

È semplice verificare che:
- Se N < 1 l'errore è infinito;
- Se N = 1 l'errore è finito ma non nullo;
- Se N > 1 l'errore è nullo.

Nei sistemi a controreazione di tipo N, ovvero con N integratori, l'errore a regime con ingresso a rampa parabolica diviene:

$$e_{ss}=\lim_{t\to\infty} e(t)=\lim_{s\to 0} sE(s)=\lim_{s\to 0}\frac{2s\,A/s^3}{1+L(s)}=$$

$$=\lim_{s\to 0}\frac{2A/s^2}{1+K\prod_{i=1}^{M}(z_i)\Big/ s^N\prod_{k=1}^{Q}(p_k)}=\lim_{s\to 0}\frac{2As^{N-2}\prod_{k=1}^{Q}(p_k)}{s^N\prod_{k=1}^{Q}(p_k)+K\prod_{i=1}^{M}(z_i)}$$

È semplice verificare che:
- Se N < 2 l'errore è infinito;
- Se N = 2 l'errore è finito ma non nullo;
- Se N > 2 l'errore è nullo.

Lezione 042

01. Quali sono le prestazioni generalmente richieste al transitorio della risposta a gradino di un sistema?

- [ ] Tempo di salita minimo e tempo al picco minimo.
- [x] Prontezza e fedeltà di risposta.
- [ ] Nessuna delle altre risposte proposte è corretta
- [ ] Grande tempo al picco e piccolo tempo di assestamento.

02. Spiegare brevemente come si misurano prontezza e fedeltà di risposta e indicare perché essi rappresentano due requisiti contrastanti.

Le prestazioni richieste al regime transitorio di una risposta al gradino sono prontezza e fedeltà di risposta. La prima si misura con il tempo di salita e il tempo al picco. La seconda si misura con la sovraelongazione e il tempo di assestamento.
Abbiamo visto come spostando nel piano complesso le radici di un sistema si possono ottenere risposte al gradino con caratteristiche molto differenti tra loro.
Purtroppo la prontezza e la fedeltà di risposta sono requisiti contrastanti, ovvero volendo aumentare la prontezza di risposta di un sistema, diminuisce la fedeltà di risposta e viceversa, pertanto solo un compromesso tra le due può portare a soluzioni realizzabili.

Lezione 043

01. Quale delle seguenti descrive correttamente il criterio di Routh-Hurwitz?

☐ Nessuna delle altre risposte proposte è corretta

☐ Il numero delle radici con parte reale negativa del denominatore della funzione di trasferimento del sistema è uguale al numero di inversioni di segno nella prima colonna della tabella di Routh.

☐ Il numero delle radici con parte reale nulla del denominatore della funzione di trasferimento del sistema è uguale al numero di inversioni di segno nella prima colonna della tabella di Routh.

■ Condizione necessaria e sufficiente affinché il sistema sia stabile asintoticamente è che non ci siano cambiamenti di segno nella prima colonna della tabella di Routh.

02. Qual è la condizione necessaria e sufficiente affinché un sistema lineare sia asintoticamente stabile?

■ Che tutti i poli della funzione di trasferimento del sistema siano a parte reale negativa.

☐ Che tutti i poli della funzione di trasferimento del sistema siano a parte reale negativa o nulla.

☐ Che tutti i poli della funzione di trasferimento del sistema siano a parte reale positiva.

☐ Nessuna delle altre risposte proposte è corretta

03. Qual è la tipologia di stabilità che più interessa raggiungere a chi si occupa del progetto di sistemi di controllo?

☐ Instabilità.

■ Stabilità asintotica.

☐ Stabilità marginale.

☐ Nessuna delle altre risposte proposte è corretta

04. Quale delle seguenti affermazioni è corretta con riferimento al grado di stabilità di un sistema lineare?

☐ Nessuna delle altre risposte proposte è corretta

☐ Quanto più le radici del denominatore della funzione di trasferimento sono collocate a destra dell'asse immaginario, tanto più grande sarà il grado di stabilità del sistema rispetto a cambiamenti parametrici.

■ Quanto più le radici del denominatore della funzione di trasferimento sono collocate a sinistra dell'asse immaginario, tanto più grande sarà il grado di stabilità del sistema rispetto a cambiamenti parametrici.

☐ Il luogo delle radici non consente di valutare se al variare dei parametri le radici del denominatore della funzione di trasferimento posso andare oltre il limite di stabilità.

05. Quando un sistema controllato è definito stabile?

☐ Nessuna delle altre risposte proposte è corretta

☐ Un sistema controllato è stabile se ad un qualsiasi ingresso limitato corrisponde una uscita illimitata.

■ Un sistema controllato è stabile se ad un qualsiasi ingresso limitato corrisponde una uscita limitata.

☐ Un sistema controllato è stabile se ad un qualsiasi ingresso limitato corrisponde una uscita nulla.

06. Detta x0 la condizione di equilibrio del sistema, se, a seguito dell'intervento di un disturbo o ingresso, il sistema torna di nuovo nella condizione di equilibrio x0, che tipo di comportamento di stabilità esibisce il sistema?

☐ Il sistema è solo marginalmente stabile.

■ Il sistema è stabile asintoticamente.

☐ Il sistema è instabile.

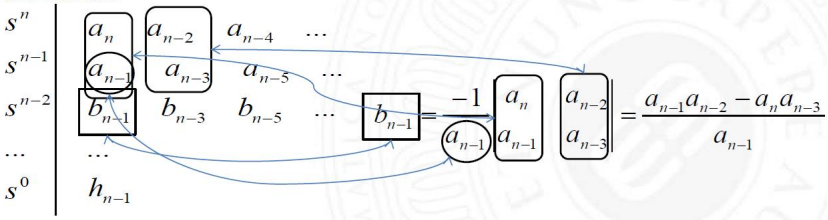
☐ Nessuna delle altre risposte proposte è corretta

07. Illustrare brevemente il criterio di stabilità di Routh-Hurwitz.

Sappiamo che in un sistema lineare la condizione necessaria e sufficiente affinché un sia stabile asintoticamente è che tutti i poli della funzione di trasferimento del sistema abbiano parte reale negativa. Prendiamo quindi il denominatore della funzione di trasferimento, ovvero il polinomio caratteristico del sistema:

$$\Delta(s) = q(s) = a_n s^n + \ldots + a_1 s + a_0 = a_n (s - r_1) \ldots (s - r_n) = 0$$

Il criterio di Routh-Hurwitz stabilisce **che il numero delle radici di q(s) con parte reale positiva è uguale al numero di inversioni di segno nella tabella di Routh** così ottenuta:



Lezione 044

01. Quali delle seguenti affermazioni è corretta con riferimento al metodo del luogo delle radici?

☐ Non c'è alcun collegamento tra il tracciamento del luogo delle radici e la collocazione nel piano complesso dei poli della funzione di trasferimento del sistema ad anello chiuso.

☐ Se il guadagno del controllore K tende ad infinito, il luogo delle radici della funzione di trasferimento del sistema controllato tende ai poli della funzione di trasferimento del sistema da controllare.

☐ Nessuna delle altre risposte proposte è corretta

■ Se il guadagno del controllore K tende a 0, il luogo delle radici della funzione di trasferimento del sistema controllato tende ai poli della funzione di trasferimento del sistema da controllare.

02. Come avviene in genere la sintesi di una legge di controllo nel dominio s?

☐ Si usa sempre il metodo del luogo delle radici.

■ Per garantire un errore basso o nullo rispetto al segnale di riferimento, si applica uno schema di controllo a controreazione e si posiziona un numero adeguato di integratori nel guadagno di anello. Per garantire la stabilità del sistema e le prestazioni nel transitorio si dimensiona il guadagno K applicando il metodo del luogo delle radici.

☐ Per garantire un errore basso o nullo rispetto al segnale di riferimento, si applica uno schema di controllo ad anello aperto e si posiziona un numero adeguato di derivatori nel guadagno di anello. Per garantire la stabilità del sistema e le prestazioni nel transitorio si dimensiona il guadagno K applicando il metodo del luogo delle radici.

☐ Nessuna delle altre risposte proposte è corretta

03. Si illustrino chiaramente le regole per il tracciamento del luogo delle radici.

Il primo passo è quello di esprimere l'equazione caratteristica nella forma:

$$q(K,s)=\Delta(K,s)=1+KG(s)=0$$

Ovvero nella forma:

$$s^N\prod_{k=1}^{Q}(s+p_k)+K\prod_{i=1}^{M}(s+z_i)=0$$

Si riportano quindi nel piano complesso con una "X" tutti i poli e con un "O" tutti gli zeri.

Quando K = 0 i rami partono dai poli. Quando K tende ad infinito, alcuni rami convergono negli zeri, altri si allontanano asintoticamente.

Il luogo delle radici è composto da un numero di rami pari al numero di poli. Quando un polo è reale, il ramo ad esso associato parte dall'asse reale. E' possibile dimostrare che **appartengono al luogo delle radici tutti i tratti dell'asse reale a sinistra di un numero dispari di singolarità (poli o zeri) disposti sull'asse reale**.

Abbiamo detto che in generale la funzione di trasferimento del sistema da controllare avrà un numero di poli maggiore o uguale del numero di zeri. Quando il numero di poli (N+P) è maggiore del numero degli zeri (M), ovviamente alcuni rami dovranno asintoticamente tendere all'infinito, ovvero a degli zeri all'infinito.

La caratteristica interessante degli N+P-M asintoti è che sono tutte semirette centrate nel punto reale (σ_A,0) chiamato centro stella, dove:

$$\sigma_A=\left[\sum_{k=1}^{Q}(-p_k)-\sum_{i=1}^{M}(-z_i)\right]\Big/(N+P-M)$$

Rispetto all'asse reale, gli asintoti hanno un angolo dato da:

$$\varphi_A=\frac{2k+1}{N+P-M}180^\circ \quad k=0,1,2,\ldots,(N+P-M-1)$$

Sappiamo che la stabilità di un sistema controllato è fondamentale e la condizione necessaria e sufficiente è quella che tutte le radici dell'equazione caratteristica del sistema controllato siano nel semipiano sinistro del dominio s. Ciò coincide nel richiedere che il valore del parametro K sia scelto in maniera tale che le radici siano tutte collocate nel semipiano sinistro.

Sulla base dei passi 1, 2 e 3 è facile comprendere se il luogo delle radici intersecherà per qualche valore di K l'asse immaginario. In caso affermativo si può utilizzare il criterio di Routh-Hurwitz per calcolare il valore esatto di K per cui il sistema è asintoticamente stabile.

Al tendere di K all'infinito alcuni rami del luogo delle radici tendono asintoticamente agli zeri all'infinito, come visto al passo 3. Quando i rami che vanno all'infinito partono da poli reali, esiste un valore di K a partire dal quale le soluzioni reali diverranno immaginarie e tenderanno ad accostarsi agli asintoti. Tale valore di K determina quindi un punto di diramazione (breakway point) dei rami, oltre il quale i rami smettono di percorrere l'asse reale e si portano verso gli asintoti.

Per calcolare il punto di diramazione si riscrive l'equazione caratteristica nella forma:

$$q(K,s)=1+KG(s)=0\rightarrow K=P(s)$$

Per individuare il breakway point si risolve l'equazione:

$$\frac{dK}{ds}=\frac{dP(s)}{ds}=0$$

Le tangenti al luogo nel punto di uscita sono egualmente spaziate sui 360°. Pertanto se sono 2 i rami a lasciare l'asse reale, le tangenti saranno ortogonali all'asse reale. Se i rami sono 4, saranno spaziati tra di loro di 90°. E così via.

Per affinare il luogo delle radici si può determinare con quale angolo i rami escano od entrino rispettivamente dai poli o negli zeri.

L'angolo di uscita di un ramo del luogo da un polo è la differenza tra l'angolo dovuto a tutti gli altri poli e zeri e il secondo membro della condizione di fase (180° ± n360° con n = 1,2,3,...). Analogamente l'angolo di ingresso di un ramo del luogo in uno zero è la differenza tra l'angolo dovuto a tutti gli altri poli e zeri e il secondo membro della condizione di fase (180° ± n360° con n = 1,2,3,...).

Ovvero considerato un polo o uno zero, si calcolano gli angoli (rispetto all'asse reale) delle semirette orientate che partono da uno qualsiasi degli altri poli e/o zeri e passino per il polo o lo zero considerato. Si somma tali angoli e gli si sottrae (180° ± n360° con n = 1,2,3,...). Ciò determina una retta la quale è la tangente al luogo nel punto (polo o zero) considerato.

L'ultimo passo è quello di tracciare i rami, partendo dai poli e seguendo i vincoli dei primi 6 passi. Il risultato è il luogo delle radici nel piano complesso s, al variare del parametro K da zero ad infinito.

Individuate in base alla stabilità (semipiano sinistro) e alle prestazioni nel regime transitorio le aree del piano s in cui si desidera avere le radici, si confronteranno tali aree con il luogo delle radici, se il luogo attraversa le aree, allora è possibile individuare i valori di K per cui il sistema controllato a catena chiusa soddisfa le condizioni di stabilità e le prestazioni.

Questo dimostra la validità e l'utilità dell'utilizzo del metodo del luogo delle radici per ottenere gli obiettivi richiesti da un sistema controllato, utilizzando una modalità di controllo a catena chiusa, variando semplicemente il valore del guadagno del controllore.

Lezione 045

01. Perché si utilizzano i decibel per tracciare il diagramma di Bode del modulo di una funzione di trasferimento?

☐ Perché in decibel tutte le sommatorie si trasformano in produttorie. Inoltre, è possibile valutare visivamente in maniera più semplice per quali frequenze il modulo della funzione di trasferimento amplifica in maniera sensibile il segnale.

☐ Perché in decibel tutte le sommatorie si trasformano in produttorie. Inoltre, è possibile valutare visivamente in maniera più semplice per quali intervalli di ampiezza del modulo la fase della funzione di trasferimento amplifica in maniera sensibile il segnale.

■ Perché in decibel tutte le produttorie si trasformano in sommatorie. Inoltre, è possibile valutare visivamente in maniera più semplice per quali frequenze il modulo della funzione di trasferimento attenua in maniera sensibile il segnale.

☐ Nessuna delle altre risposte proposte è corretta

02. Che scala si adotta nelle ascisse dei diagrammi di Bode delle fasi?

☐ Esponenziale

☐ Naturale

☐ Lineare

■ Logaritmica

03. Come si rappresentano i moduli nel relativo diagramma di Bode?

☐ Si raddoppia il modulo.

☐ Si rappresenta il modulo esponenziale.

☐ Si rappresenta il modulo naturale.

■ In decibel.

04. Che scala si adotta nelle ascisse dei diagrammi di Bode dei moduli?

☐ Naturale

☐ Esponenziale

☐ Lineare

■ Logaritmica

05. Cosa sono i diagrammi di Bode?

☐ Nessuna delle altre risposte proposte è corretta

■ Sono i diagrammi del modulo e della fase della funzione di risposta armonica di un sistema dinamico lineare.

☐ Sono una rappresentazione in forma grafica della funzione di trasferimento di un sistema.

☐ Sono la rappresentazione sul piano complesso degli autovalori di un sistema.

06. Quale delle seguenti affermazioni è corretta con riferimento alla risposta armonica?

☐ La risposta armonica di un sistema lineare instabile è una sinusoide la cui frequenza è uguale a quella del segnale di ingresso, ampiezza e fase sono invece modificate dal modulo e dalla fase della funzione di trasferimento calcolate nel punto (0, i*omega).

☐ Nessuna delle altre risposte proposte è corretta

■ La risposta armonica di un sistema lineare stabile è una sinusoide la cui frequenza è uguale a quella del segnale di ingresso (cioè omega), ampiezza e fase sono invece modificate dal modulo e dalla fase della funzione di trasferimento calcolate nel punto (0, i*omega).

☐ La risposta armonica di un sistema lineare stabile è una sinusoide la cui frequenza è indipendente dal segnale di ingresso, ampiezza e fase sono invece modificate dal modulo e dalla fase della funzione di trasferimento calcolate nel punto (0, i*omega).

07. Quando è preferibile utilizzare la sintesi nel dominio della frequenza rispetto alla sintesi nel dominio s?

■ Quando interessano specifiche nel comportamento frequenziale (banda passante, risonanza, etc.), è opportuno utilizzare la sintesi nel dominio della frequenza. Quando interessano prestazioni nel transitorio di una risposta a gradino, è opportuno utilizzare la sintesi nel dominio s.

☐ Nessuna delle altre risposte proposte è corretta

☐ Si tratta di due metodi di sintesi del tutto equivalenti e alternativi.

☐ Quando interessano specifiche nel comportamento frequenziale (banda passante, risonanza, etc.), è opportuno utilizzare la sintesi nel dominio s. Quando interessano prestazioni nel transitorio di una risposta a gradino, è opportuno utilizzare la sintesi nel dominio della frequenza.

08. Qual è la definizione di risposta in frequenza di un sistema?

■ E' definita come la risposta a regime permanente (quindi estinto il regime transitorio) di un sistema rispetto ad un segnale di ingresso sinusoidale.

☐ E' definita come la risposta a regime permanente (quindi estinto il regime transitorio) di un sistema rispetto ad un segnale di ingresso canonico.

☐ E' definita come la risposta nel regime transitorio (quindi prima del regime permanente) di un sistema rispetto ad un segnale di ingresso sinusoidale.

☐ Nessuna delle altre risposte proposte è corretta

09. Si illustrino i vantaggi e gli svantaggi associati all'uso della risposta in frequenza.

Vantaggi di usare la risposta in frequenza

Se un sistema lineare è stabile, generando un segnale di ingresso sinusoidale di ampiezza, frequenza e fase nota, si otterrà in uscita un segnale la cui ampiezza e fase permetteranno immediatamente di conoscere il valore di modulo e fase della funzione di trasferimento nel punto del piano complesso $0 \pm i\omega$ corrispondenti alla pulsazione ω del segnale sinusoidale di ingresso.

Generare segnali di ingresso sinusoidali di ampiezza e frequenza voluti è piuttosto semplice, quindi si può ricostruire sperimentalmente il valore di una T(s) non nota per tutte le s appartenenti all'asse immaginario, ovvero per $s = 0 \pm i\omega$.

Lavorare nel dominio della frequenza permette al progettista del sistema di controllo di garantire un altro tipo di specifiche a regime permanente che riguardano disturbi, errori di misura e banda passante del sistema controllato.

Un vantaggio dell'analisi in frequenza è che il sistema è descritto da una funzione di trasferimento $T(i\omega)$ che è ricavabile dalla T(s) semplicemente effettuando la sostituzione $s = i\omega$, ovvero riducendo il campo d'analisi della funzione di trasferimento dall'intero piano s al solo asse immaginario quindi analizzando il solo asse delle frequenze ω. Mentre la T(s) è una funzione complessa della variabile complessa s, $T(i\omega)$ è una funzione complessa della variabile complessa $i\omega$, dove a variare però è un unico parametro: ω. Quindi la $T(i\omega)$ si può studiare graficamente con opportuni diagrammi bidimensionali.

Svantaggi di usare la risposta in frequenza

A fronte di tanti vantaggi, l'analisi e la progettazione di sistemi controllati nel dominio della frequenza ha un limite importante: il legame tra le modifiche effettuate al sistema nel dominio della frequenza e l'effetto delle modifiche alla risposta nel dominio del tempo sono meno evidenti che nel caso del dominio s.

Mentre nel dominio s per ottenere stabilità, attenuazione dei disturbi e dei rumori di misura, sovraelongazione e tempi di assestamento voluti, è sufficiente collocare opportunamente i poli del polinomio caratteristico del sistema, la stessa cosa non è altrettanto semplice nel dominio della frequenza e richiede metodi di analisi e progettazione differenti.

In generale, dato un sistema da controllare, in base alla funzionalità, alle specifiche e alle prestazioni richieste dal sistema controllato, si può determinare se applicare i metodi di analisi e progettazione nel dominio s oppure i metodi nel dominio della frequenza.

Quando interessano prestazioni nel transitorio ad una risposta a gradino, è meglio utilizzare i metodi di analisi e sintesi nel dominio s. Quando interessano specifiche nel comportamento frequenziale (banda passante, risonanza, etc.) è opportuno utilizzare i metodi di analisi e sintesi nel dominio della frequenza.

Lezione 046

01. Quale delle seguenti affermazioni è corretta con riferimento al contributo in modulo fornito al diagramma di Bode da poli o zeri nell'origine?

☐ Nessuna delle altre risposte proposte è corretta

☐ Il contributo in modulo fornito da poli o zeri nell'origine è una inclinazione permanente di -20db/decade per ogni zero nell'origine, e di +20dB/decade per ogni polo nell'origine.

☐ Il contributo in modulo fornito da poli e zeri nell'origine è rispettivamente un contributo costante di +90° e -90°.

■ Il contributo in modulo fornito da poli o zeri nell'origine è una inclinazione permanente di +20db/decade per ogni zero nell'origine, e di -20dB/decade per ogni polo nell'origine.

02. Come si calcolano il modulo in decibel di un numero M?

☐ 10log(M)

■ 20log(M)

☐ log(M)

☐ 10M

03. Quanto vale il modulo in decibel di 1?

☐ 20 db

☐ 100 db

☐ 10 db

■ 0 db

04. Quanti sono i diagrammi di Bode?

■ 2

☐ 1

☐ 4

☐ 3

05. Cosa vi è in ascissa dei diagrammi di Bode?

☐ Il tempo

☐ I moduli

■ Le pulsazioni

☐ Le fasi

06. Quanto vale il modulo naturale di 1+j2?

☐ 1

☐ 5

■ radice di 5

☐ 2

07. Quanto vale il modulo in decibel di 10?

■ 20 db

☐ 0 db

☐ 100 db

☐ 10 db

08. Nel tracciamento dei diagrammi di Bode, in relazione a quale contributo si può calcolare la pulsazione di risonanza e riscontrare un eventuale fenomeno di risonanza?

- [x] Contributo di una coppia di poli/zeri complessi coniugati.
- [ ] Contributo di poli/zeri nell'origine.
- [ ] Contributo di poli/zeri reali.
- [ ] Nessuna delle altre risposte proposte è corretta

09. Quale funzione si rappresenta tramite i diagrammi di Bode?

- [ ] Gli zeri.
- [x] La funzione di trasferimento calcolata in j omega.
- [ ] I poli.
- [ ] La funzione di trasferimento.

10. Si illustrino brevemente le regole per il tracciamento dei diagrammi di Bode.

Tracciamento dei diagrammi di bode

Assunto che l'utilizzo del calcolatore elettronico rimane una soluzione indispensabile per tracciare i diagrammi di Bode, forniamo comunque una procedura approssimata per il tracciamento dei diagrammi, divisa in passi:

1. Si determina la funzione di trasferimento Y(s);
2. Si sostituisce $s=i\omega$ e pone la $Y(i\omega)$ nella forma:

Guadagno, Zeri reali, Zeri complessi coniugati

$$Y(i\omega)=\frac{K_b}{(i\omega)^N}\frac{\prod_{j=1}^{P}(1+i\omega\tau_i)\prod_{h=1}^{Q}\left[(i\omega/\omega_{nh})^2+i\omega(2\zeta_h/\omega_{nh})+1\right]}{\prod_{m=1}^{M}(1+i\omega\tau_m)\prod_{k=1}^{R}\left[(i\omega/\omega_{nk})^2+i\omega(2\zeta_h/\omega_{nk})+1\right]} \quad \tau_i>0 \quad \tau_m>0$$

Poli/Zeri nulli, Poli reali, Poli complessi coniugati

Assunto che l'utilizzo del calcolatore elettronico rimane una soluzione indispensabile per tracciare i diagrammi di Bode, forniamo comunque una procedura approssimata per il tracciamento dei diagrammi, divisa in passi:

1. Il diagramma del modulo parte da $20\log_{10}|K_b|$ decibel;
2. Il diagramma della fase parte da –N volte 90°, dove N rappresenta il numero di poli nell'origine (se maggiore di zero), ovvero il numero di zeri nell'origine (se minore di zero). Il diagramma della fase parte da 0° se non ci sono poli o zeri nell'origine. Inoltre se il guadagno K_b è negativo, bisogna aggiungere algebricamente ulteriori -180°.
3. Per ogni polo o zero reale si calcolano le costanti di tempo τ e le relative pulsazioni di spezzamento $1/\tau$;
4. Per ogni coppia di poli o zeri complessi coniugati si calcolano le pulsazioni naturali ω_n;
5. Si dispongono le pulsazioni di spezzamento e le pulsazioni naturali sulle ascisse del diagramma dei moduli e si tracciano le pendenze asintotiche dei contributi di ogni zero/polo nell'origine, zero/polo reale e coppia di zeri/poli complessi coniugati. La pendenza parte da –N 20 dB per decade, e ogni volta che si passa oltre una pulsazione di spezzamento o naturale la pendenza deve essere corretta di ±20 dB o ± 40 dB a seconda del tipo di polo/zero (reale o complesso coniugato).
6. Si dispongono le pulsazioni di spezzamento e le pulsazioni naturali sulle ascisse del diagramma delle fasi e si tracciano i diagrammi asintotici delle fasi. Il tracciamento deve tenere conto che una decade prima ed una decade dopo ogni pulsazione di spezzamento o naturale, si ha una pendenza a seconda del tipo di polo/zero a cui tale pulsazione fa riferimento.

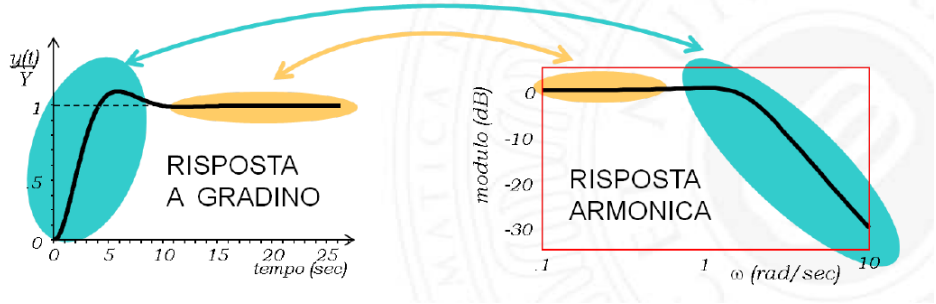
Lezione 047

01. Si illustri la relazione tra risposta a gradino e risposta armonica.

Relazione tra risposta a gradino e risposta armonica

Sulla base di quanto visto, quindi si deduce facilmente che nei sistemi dominati da una coppia di poli complessi coniugati:

1. La risposta a segnali polinomiali a regime permanente dipende dalle caratteristiche a bassa frequenza della funzione di trasferimento (guadagno e pendenza del modulo) ad anello aperto;
2. La prontezza e la fedeltà di risposta a gradino nel regime transitorio dipende dalle caratteristiche ad alta frequenza (picco alla risonanza e banda passante) della funzione di trasferimento ad anello chiuso.



Lezione 048

01. Quando una funzione di trasferimento di un sistema lineare stabile è chiamata funzione di trasferimento a fase minima?

Una funzione di trasferimento di un sistema lineare stabile è chiamata funzione di trasferimento a fase minima se tutti i suoi zeri giacciono nel semipiano sinistro del piano complesso s. E' chiamata funzione di trasferimento a fase non minima se ha degli zeri nel semipiano destro del piano s.

Lezione 049

01. Qual è l'enunciato corretto del criterio di stabilità di Nyquist?

☐ Un sistema di controllo a controreazione è stabile se e solo se il diagramma di Nyquist di L(s) effettua un numero di giri in senso antiorario intorno al punto (+1;0) pari al numero di zeri di L(s) con parte reale positiva.

☐ Nessuna delle altre risposte proposte è corretta

☐ Un sistema di controllo a controreazione è stabile se e solo se il diagramma di Nyquist di L(s) effettua un numero di giri in senso orario intorno al punto (-1;0) pari al numero di poli di L(s) con parte reale positiva.

■ Un sistema di controllo a controreazione è stabile se e solo se il diagramma di Nyquist di L(s) effettua un numero di giri in senso antiorario intorno al punto (-1;0) pari al numero di poli di L(s) con parte reale positiva.

02. Cos'è il diagramma di Nyquist?

☐ Nessuna delle altre risposte proposte è corretta

☐ E' la rappresentazione grafica sul piano complesso della funzione di risposta armonica.

■ E' una rappresentazione in forma grafica della funzione di trasferimento di un sistema.

☐ E' la rappresentazione su piano complesso degli autovalori di un sistema.

03. Quale delle seguenti affermazioni è corretta con riferimento al diagramma di Nyquist per L(s) = K/(s*(1+tau*s)), cioè con un polo reale e un polo nell'origine?

■ Supponendo che il polo reale sia negativo (quindi tau <0) se K>0 allora il sistema è stabile in quanto non si effettuano giri intorno a (-1,0), se K<0 il sistema è instabile.

☐ Supponendo che il polo reale sia negativo (quindi tau

☐ Nessuna delle altre risposte proposte è corretta Altrimenti se non c'è scritt tutto quello sottolineato in verde metti C

☐ Supponendo che il polo reale sia negativo (quindi tau

04. Descrivere, con l'aiuto di un esempio, le regole di tracciamento del diagramma di Nyquist.

Per tracciare a mano il diagramma di Nyquist della L(s) si possono sfruttare i diagrammi di Bode, al fine di tracciare modulo e fase di L(s) quando la pulsazione va da zero ad infinito. Si ribalta quindi il tracciato rispetto all'asse reale per avere il diagramma di Nyquist quando la pulsazione va da zero a meno infinito. Ma per i salti in prossimità di zeri e poli immaginari o nulli e per il semicerchio all'infinito è necessario effettuare dispendiosi calcoli. In generale quindi è piuttosto scomodo tracciare a mano i diagrammi di Nyquist e si consiglia l'uso di software specialistico.

Il criterio di stabilità di Nyquist è un metodo particolarmente brillante per verificare la stabilità di un sistema in controreazione in quanto non richiede di calcolare la funzione di trasferimento del sistema ad anello chiuso, ma solo di conoscere la funzione di trasferimento ad anello aperto L(s). Ovvero, dato che in un sistema a controreazione unitaria $L(s) = G(s)G_c(s)$, la stabilità del sistema controllato può essere verificata conoscendo la funzione di trasferimento del sistema da controllare G(s) e del controllore $G_c(s)$, che sono già note.

Lezione 050

01. Qual è la funzione di trasferimento di un sistema a controreazione non unitaria, cioè caratterizzato in un catena di reazione da un blocco con funzione di trasferimento H(s)?

■ T(s) = (Gc(s)G(s))/(1 + Gc(s)G(s)H(s)), essendo Gc(s) la fdt del controllore, G(s) la fdt di attuatore+processo, e H(s) la fdt del blocco in catena di reazione.

☐ Nessuna delle altre risposte proposte è corretta

☐ T(s) = 1/(1 + Gc(s)G(s)H(s)), essendo Gc(s) la fdt del controllore, G(s) la fdt di attuatore+processo, e H(s) la fdt del blocco in catena di reazione.

☐ E' la stessa di un sistema a controreazione unitaria.

02. Quale delle seguenti è la corretta definizione di margine di fase?

☐ Il margine di fase è l'aumento di guadagno del sistema, quando la fase è uguale a -180°, che porterà il sistema ad essere marginalmente stabile con l'intersezione del punto (-1;0) sul diagramma di Nyquist.

☐ Il margine di fase è definito come l'incremento del valore del guadagno, quando il modulo è unitario, che porta il sistema al limite della stabilità con l'attraversamento del punto (-1;0) sul diagramma di Nyquist.

■ Il margine di fase è definito come l'incremento del valore della fase di L(i*omega), quando il modulo è unitario, che porta il sistema al limite della stabilità con l'attraversamento del punto (-1;0) sul diagramma di Nyquist.

☐ Nessuna delle altre risposte proposte è corretta

03. Quale delle seguenti è la corretta definizione di margine di guadagno?

■ Il margine di guadagno è l'aumento di guadagno del sistema, quando la fase è uguale a -180°, che porterà il sistema ad essere marginalmente stabile con l'intersezione del punto (-1;0) sul diagramma di Nyquist.

☐ Il margine di guadagno è l'aumento di fase del sistema, quando il guadagno è uguale a 20 dB, che porterà il sistema ad essere marginalmente stabile con l'intersezione del punto (-1;0) sul diagramma di Nyquist.

☐ Nessuna delle altre risposte proposte è corretta

☐ Il margine di guadagno è definito come l'incremento del valore della fase di L(i*omega), quando il modulo è unitario, che porta il sistema al limite della stabilità con l'attraversamento del punto (-1;0) sul diagramma di Nyquist.

04. Indicare, con l'aiuto di una rappresentazione grafica, come è possibile rilevare il margine di guadagno e il margine di fase dai diagrammi di Bode.

Margine di guadagno nei diagrammi di Bode

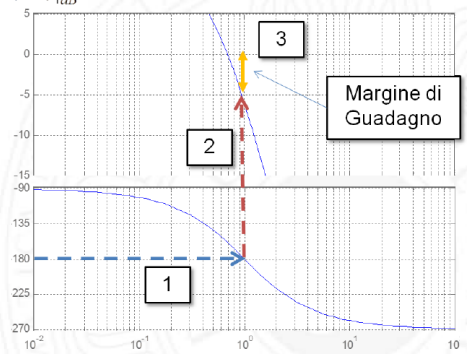
Essendo il margine di guadagno un fattore moltiplicativo, si può esprimere in deciBel:

$$gm_{dB} = -20\log_{10}\left|L(i\bar{\omega})\right| = -\left|L(i\bar{\omega})\right|_{dB}$$

$$\left|L(i\bar{\omega})\right| = -180°$$

Ma questo valore può essere ricavato dai diagrammi di Bode:

1. Dal diagramma delle fasi si trova la pulsazione ω per cui la fase vale -180°.
2. Si riporta tale pulsazione nel diagramma dei moduli e si ottiene il valore del modulo in deciBel.
3. Si cambia di segno e si ottiene il margine di guadagno, che è quindi pari alla distanza tra il punto intercettato e l'asse a 0 dB.

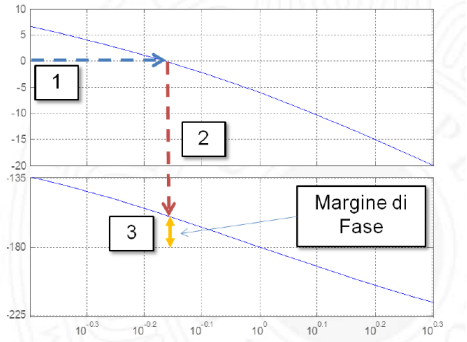


Margine di fase nei diagrammi di Bode

Essendo il margine di fase calcolato quando il modulo è unitario, nei diagrammi di Bode è immediato identificare il margine di fase quando:

$$\left|L(i\bar{\omega})\right|_{dB} = 0$$

1. Dal diagramma dei moduli si trova la pulsazione ω di attraversamento dell'asse a 0 dB;
2. Si riporta tale pulsazione nel diagramma delle fasi;
3. La differenza tra la fase così ottenuta e -180°, rappresenta il margine di fase.



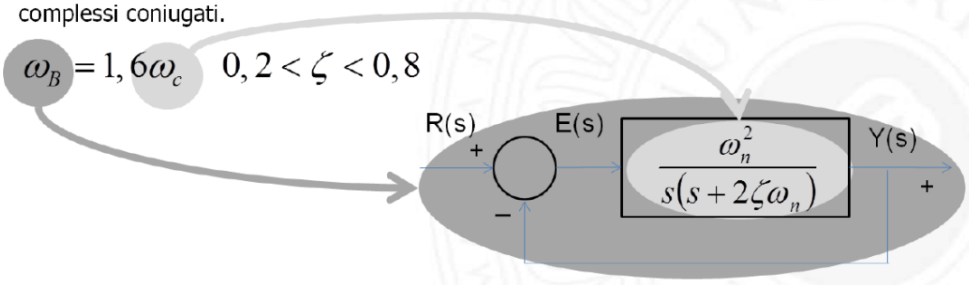
Lezione 052

01. Descrivere che tipo di legame sussiste tra la pulsazione di attraversamento della funzione ad anello aperto L(i*omega) la banda passante della funzione di trasferimento ad anello chiuso T(i*omega).

Esiste un legame, empirico, tra la pulsazione di attraversamento ω_c della funzione ad anello aperto $L(i\omega)$ e la banda passante ω_B della funzione ad anello chiuso $T(i\omega)$.

$$\omega_B = 1,6\omega_c \quad 0,2 < \zeta < 0,8$$

Per usare questa relazione è fondamentale ricordare che la banda passante è riferita a $T(i\omega)$, mentre la pulsazione di attraversamento è riferita a $L(i\omega)$. Questa relazione è valida, ovviamente, solo quando il sistema controreazionato è dominato da due poli complessi coniugati.



Lezione 053

01. Quali delle seguenti affermazioni descrive correttamente una rete anticipatrice come funzione di compensazione?

- [ ] Presenta un polo reale negativo e nessuno zero.
- [x] Presenta un polo reale negativo ed uno zero reale negativo, con il polo posizionato a sinistra dello zero.
- [ ] Presenta un polo reale negativo ed uno zero reale negativo, con il polo posizionato a destra dello zero.
- [ ] Nessuna delle altre risposte proposte è corretta

02. Quali delle seguenti affermazioni descrive correttamente una rete ritardatrice come funzione di compensazione?

- [ ] Presenta uno zero reale negativo e nessun polo.
- [ ] Presenta un polo reale negativo ed uno zero reale negativo, con il polo posizionato a sinistra dello zero.
- [x] Presenta un polo reale negativo ed uno zero reale negativo, con il polo posizionato a destra dello zero.
- [ ] Nessuna delle altre risposte proposte è corretta

03. Qual è l'obiettivo della progettazione di un controllore?

L'obiettivo è quello di individuare una funzione di trasferimento **compensatrice** Gc(s) per il controllore tale che la funzione di trasferimento T(s) del sistema sia in grado di:

- Garantire la stabilità del sistema;
- Attenuare l'effetto dei disturbi e del rumore di misura;
- Garantire le prestazioni a regime transitorio a determinati segnali di ingresso in termini di fedeltà e prontezza di risposta.

Abbiamo visto che la posizione dei poli della funzione di trasferimento del sistema controllato nel piano s influenza la stabilità e le prestazioni nel dominio del tempo, a regime transitorio della risposta a gradino. Nei sistemi a controreazione abbiamo visto come la presenza di poli nell'origine garantisca la possibilità di attenuare l'effetto di disturbi. Pertanto poter agire sul controllore, significa poter agire sulla presenza di poli nell'origine e sulla posizione dei poli della funzione di trasferimento dell'intero sistema.

Pertanto progettare il controllore significa scegliere una opportuna funzione compensatrice $G_c(s)$ in grado di soddisfare tutti i requisiti del sistema. Talvolta non è possibile soddisfare tutti i requisiti per il semplice fatto che essi conducono a soluzioni incompatibili, pertanto è compito del progettista mediare un giusto compromesso, individuando una soluzione che massimizzi la soddisfazione dei singoli requisiti.

Lezione 054

01. Quale delle seguenti affermazioni è corretta con riferimento alle reti compensatrici?

☐ La rete anticipatrice ha un comportamento assimilabile ad un integratore e può essere utilizzata per migliorare la risposta a regime permanente. Invece, la rete ritardatrice ha un comportamento assimilabile ad un derivatore e può essere utilizzata per migliorare la risposta in transitorio.

■ La rete anticipatrice ha un comportamento assimilabile ad un derivatore e può essere utilizzata per migliorare la risposta in transitorio. Invece, la rete ritardatrice ha un comportamento assimilabile ad un integratore e può essere utilizzata per migliorare la risposta a regime permanente.

☐ Nessuna delle altre risposte proposte è corretta

☐ La rete anticipatrice ha un comportamento assimilabile ad un sommatore, mentre la rete attenuatrice ha un comportamento assimilabile ad un condensatore. Entrambe permettono di migliorare la risposta a regime.

02. Quale delle seguenti affermazioni descrive uno svantaggio connesso all'uso delle reti compensatrici?

☐ Si può utilizzare solo una funzione compensatrice alla volta: la rete ritardatrice se il sistema pecca nelle specifiche a regime permanente, la rete anticipatrice se il sistema pecca nel regime transitorio.

☐ Il metodo di sintesi mediante reti compensatrici è sempre valido.

☐ Nessuna delle altre risposte proposte è corretta

■ Il metodo di sintesi mediante reti compensatrici vale solo quando il sistema è dominato da una coppia di poli complessi: che ciò valga deve essere verificato al calcolatore su un modello completo del sistema controllato.

Lezione 055

01. Quale delle seguenti è vera con riferimento all'utilità di una rete anticipatrice?

☐ Una rete anticipatrice ha il vantaggio di abbattere il guadagno della funzione ad anello aperto solo alle alte frequenze, lasciando pertanto inalterate le specifiche a regime permanente sull'attenuazione dei disturbi canonici.

☐ Nessuna delle altre risposte proposte è corretta

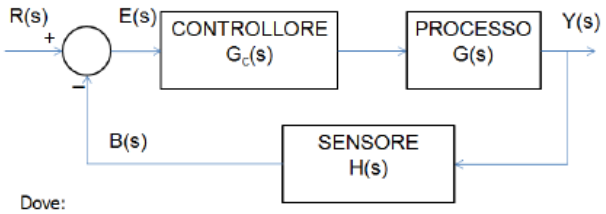
■ Una rete anticipatrice ha il vantaggio di aumentare il margine di fase del sistema in controreazione, quindi consente di migliorare la stabilità del sistema e le prestazioni dinamiche.

☐ Una rete anticipatrice attenua tutte le frequenze a destra della frequenza di spezzamento dello zero.

02. Si illustri un esempio di uso di una rete anticipatrice, ai fini del progetto di una legge di controllo nel dominio della frequenza.

Esempio di utilizzo delle reti compensatrici

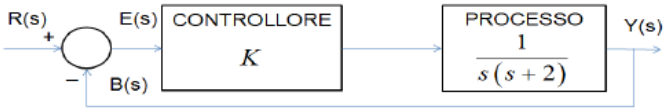
Consideriamo il seguente sistema a controreazione:



Dove:

$$G_c(s) = K \qquad H(s) = 1 \qquad G(s) = \frac{1}{s(s+2)}$$

Il sistema in esame può pertanto essere espresso con il seguente schema:

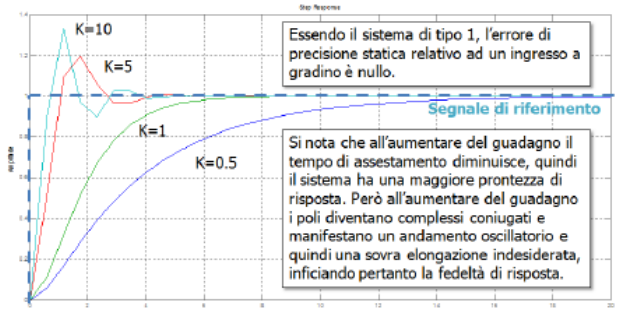


La funzione di trasferimento ingresso-uscita è pertanto:

$$W(s) = \left.\frac{Y(s)}{R(s)}\right|_{T(s)=0} = \frac{L(s)}{1+L(s)} = \frac{K}{s^2+2s+K}$$

Ovvero un sistema con due poli coniugati. Analizziamo le prestazioni di tale sistema nel regime transitorio e nel regime permanente.

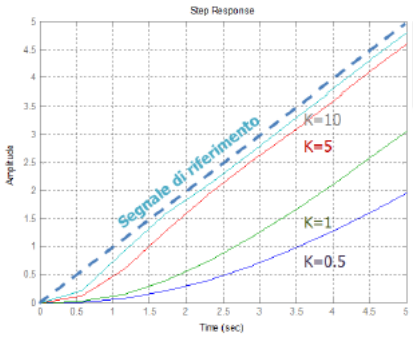
La risposta ad un gradino unitario ha la seguente forma:



Essendo il sistema di tipo 1, l'errore di precisione statica relativo ad un ingresso a gradino è nullo.

Si nota che all'aumentare del guadagno il tempo di assestamento diminuisce, quindi il sistema ha una maggiore prontezza di risposta. Però all'aumentare del guadagno i poli diventano complessi coniugati e manifestano un andamento oscillatorio e quindi una sovra elongazione indesiderata, inficiando pertanto la fedeltà di risposta.

La risposta ad una rampa lineare ha la seguente forma:



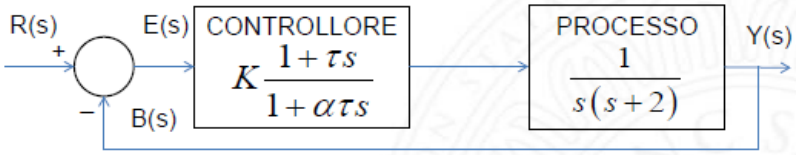
Essendo il sistema di tipo 1, l'errore di precisione statica relativo ad un ingresso a rampa lineare non è nullo e dipende dal valore del guadagno.

Lezione 056

01. Si illustri un esempio di uso di una rete ritardatrice, ai fini del progetto di una legge di controllo nel dominio della frequenza.

Esempio – Uso della rete ritardatrice

Il margine di fase non è soddisfacente. Proviamo ad aggiungere in cascata una rete ritardatrice nel controllore:



Ai fini del regime permanente la rete ritardatrice non influenza la precisione statica, pertanto scegliendo K = 40 garantisce la soddisfazione del requisito sulla precisione di risposta a regime permanente ad ingressi a rampa lineare.

Il margine di fase del sistema non compensato è circa 20°, molto lontano dal 45° richiesto. Aumentiamo il margine di altri 5° per essere sicuri di bilanciare il ritardo imposta dalla rete ritardatrice. Quindi il nuovo margine di fase è 50°.

Torniamo pertanto sul diagramma di Bode a cercare la pulsazione di attraversamento desiderata per tale margine di fase e la corrispondente attenuazione in decibel necessaria.

© 2016 Università Telematica eCampus - Data Stampa 14/12/2016 15:06:46 - 69/108

Lezione 057

01. Quale delle seguenti affermazioni è corretta con riferimento alle istruzioni base di MATLAB?

☐ impulse (num, den, t) calcola la risposta allo scalino del sistema la cui funzione di trasferimento è descritta dai polinomi num e den. t è il vettore che definisce il tempo.

■ lsim (num, den, u, t) calcola la risposta del sistema la cui funzione di trasferimento è descritta dai polinomi num e den, rispetto all'ingresso u. t è il vettore che definisce il tempo.

☐ step (num, den, t) calcola la risposta all'impulso del sistema la cui funzione di trasferimento è descritta dai polinomi num e den. t è il vettore che definisce il tempo.

☐ Nessuna delle altre risposte proposte è corretta

02. Quale delle seguenti affermazioni è corretta con riferimento alle istruzioni base di MATLAB?

☐ bode (num, den) traccia il diagramma di Bode e il diagramma di Nyquist della funzione di trasferimento descritta dai polinomi num e den.

☐ nyquist (num, den, w) visualizza automaticamente il diagramma di modulo e fase della funzione di trasferimento descritta dai polinomi num e den in corrispondenza delle pulsazioni specificate dal vettore w.

☐ Nessuna delle altre risposte proposte è corretta

■ bode (num, den, w) calcola modulo e fase della funzione di trasferimento descritta dai polinomi num e den in corrispondenza delle pulsazioni specificate dal vettore w.

Lezione 058

01. Quale delle seguenti istruzioni consente in MATLAB la conversione di un sistema a tempo continuo in uno a tempo discreto?

☐ Nessuna delle altre risposte proposte è corretta

☐ sys_discreto = convert2discrete(sys_continuo, T, 'zoh'); dove T è l'ampiezza del periodo di campionamento e 'zoh' è il metodo con il quale si vuole effettuare la conversione (in alternativa, 'tustin').

☐ sys_discreto = convert_to_discrete(sys_continuo);

■ sys_discreto = c2d(sys_continuo, T, 'zoh'); dove T è l'ampiezza del periodo di campionamento e 'zoh' è il metodo con il quale si vuole effettuare la conversione (in alternativa, 'tustin').

02. Quale delle seguenti istruzioni consente in MATLAB la rappresentazione nello spazio di stato di un sistema a tempo discreto?

■ sys_sd = ss(A_d, B_d, C_d, D_d, T); dove T è il tempo di campionamento.

☐ sys = tf (num, den); viene impostato un tempo di campionamento standard.

☐ sys = ss (A, B, C, D); viene impostato un tempo di campionamento standard.

☐ Nessuna delle altre risposte proposte è corretta

03. Quale delle seguenti istruzioni consente la rappresentazione di un sistema in MATLAB tramite funzione di trasferimento?

☐ sys = transfer_function_representation;

☐ sys = ss (A, B, C, D); crea un oggetto che rappresenta un modello nello spazio di stato di un sistema a tempo continuo. In input vengono passate le 4 matrici A, B, C, D.

■ sys = tf (num, den); crea una funzione di trasferimento a tempo continuo con numeratore e denominatore specificato dai parametri num e den.

☐ Nessuna delle altre risposte proposte è corretta

04. Quale delle seguenti istruzioni consente in MATLAB la rappresentazione di un sistema a tempo continuo nello spazio di stato con matrici A, B, C, D?

☐ sys = tf (num, den); crea una funzione di trasferimento a tempo continuo con numeratore e denominatore specificato dai parametri num e den.

☐ sys = state_space_representation;

■ sys = ss (A, B, C, D); crea un oggetto che rappresenta un modello nello spazio di stato di un sistema a tempo continuo. In input vengono passate le 4 matrici A, B, C, D.

☐ Nessuna delle altre risposte proposte è corretta

05. Quale delle seguenti istruzioni consente in MATLAB la rappresentazione di un sistema in forma zeri-poli-guadagno?

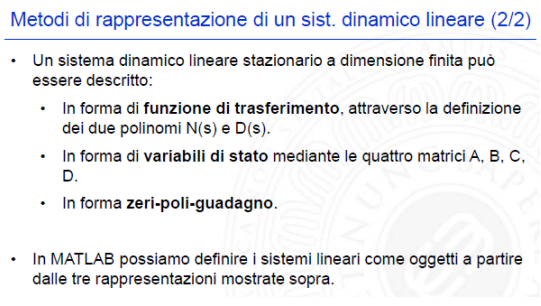
☐ sys = tf (num, den); crea una funzione di trasferimento a tempo continuo con numeratore e denominatore specificato dai parametri num e den.

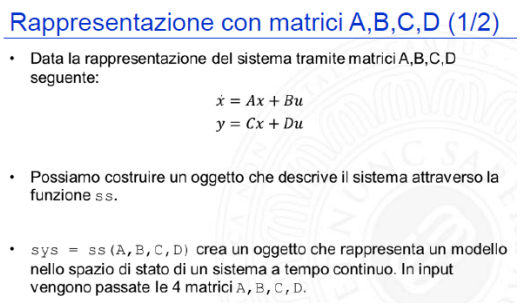
☐ sys = ss (A, B, C, D); crea un oggetto che rappresenta un modello nello spazio di stato di un sistema a tempo continuo. In input vengono passate le 4 matrici A, B, C, D.

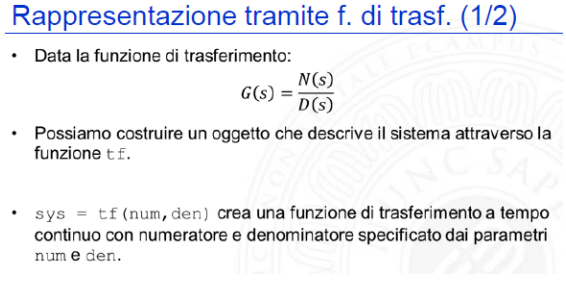
■ sys = zpk (z, p, k); crea un oggetto che rappresenta un sistema a tempo continuo passando in input gli zeri z, i poli p e il guadagno k.

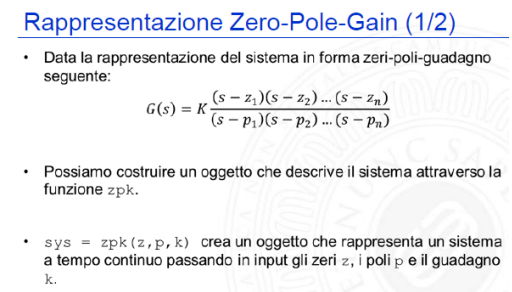
☐ Nessuna delle altre risposte proposte è corretta

06. Descrivere le principali modalità di rappresentazione di un sistema dinamico in MATLAB.









© 2016 Università Telematica eCampus - Data Stampa 14/12/2016 15:06:46 - 71/108

Lezione 059

01. Quale dei seguenti è un esempio corretto di istruzione MATLAB che consente di tracciare l'evoluzione libera di un sistema?

- [ ] Nessuna delle altre risposte proposte è corretta
- [x] [y, t, x] = initial(sys, x0); genera i vettori t, x, y a partire dall'oggetto sys e dal vettore di condizioni iniziali x0 ricevuti in input.
- [ ] [y, t, x] = free_evolution(sys, x0); genera i vettori t, x, y a partire dall'oggetto sys e dal vettore di condizioni iniziali x0 ricevuti in input.
- [ ] [y, t, x] = step(sys); genera i vettori t, x, y a partire dall'oggetto sys ricevuto in input.

02. Quale dei seguenti è un esempio corretto di istruzione MATLAB che consente di tracciare la risposta a gradino di un sistema?

- [ ] [y, t, x] = initial(sys, x0); genera i vettori t, x, y a partire dall'oggetto sys e dal vettore di condizioni iniziali x0 ricevuti in input.
- [x] [y, t, x] = step(sys); genera i vettori t, x, y a partire dall'oggetto sys ricevuto in input.
- [ ] sys = zpk (z, p, k); crea un oggetto che rappresenta un sistema a tempo continuo passando in input gli zeri z, i poli p e il guadagno k.
- [ ] Nessuna delle altre risposte proposte è corretta

03. Riportare un esempio di simulazione dell'evoluzione libera oppure della risposta a gradino di un circuito RLC mediante istruzioni MATLAB.

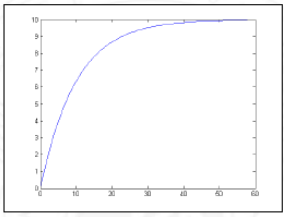
Esempio risposta a gradino: circuito RLC (1/2)

Poniamo:

```
R=10;L=1;C=1;
```

E calcoliamo la risposta a gradino del sistema (disegniamo l'uscita y):

```
A = [0 1/C; -1/L -R/L];
B = [1;0]; C=[1 0]; D=0;
sys=ss(A,B,C,D);
[y,t,x]=step(sys);
plot(t,y);
```



Carica del condensatore

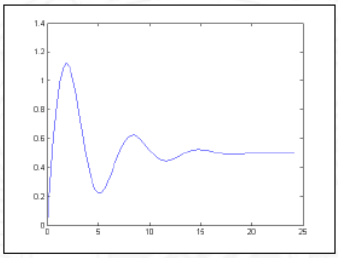
Esempio risposta a gradino: circuito RLC (2/2)

Con $R = 10$ (slide precedente) il sistema converge senza oscillazioni ma più lentamente al valore di regime pari a 10.

Se poniamo invece:

```
R=0.5;L=1;C=1;
```

Notiamo che in uscita raggiungiamo il valore di regime 0.5 con alcune oscillazioni ma più



Lezione 061

01. Quali sono gli elementi necessari per costruire un modello SIMULINK corretto di un sistema fisico massa-molla-smorzatore di equazione xdoubledot = -(c/m)*xdot - (k/m)*x ?

☐ Un blocco risolutore di un'equazione differenziale del secondo ordine, disponibile nella relativa libreria.

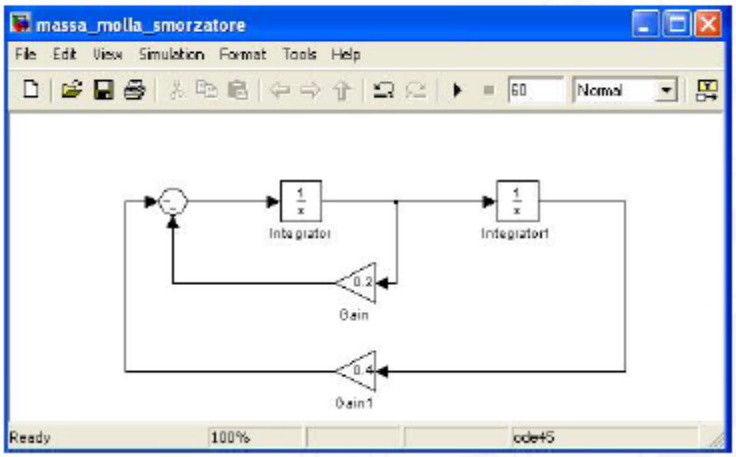
■ Due integratori, due blocchi di guadagno costante ed un sommatore (algebrico).

☐ Un integratore e un blocco di guadagno.

☐ Nessuna delle altre risposte proposte è corretta

02. Si rappresenti un modello SIMULINK (cioè uno schema a blocchi costituito da elementi della libreria SIMULINK) del classico sistema fisico massa-molla-smorzatore.

Il sistema finale è quello mostrato in figura. La costante c/m è pari a 0.2 e la costante k/m è pari a 0.4.



Lezione 062

01. Quale elemento è necessario in SIMULINK per osservare l'evoluzione di un sistema durante la simulazione effettuata?

☐ E' necessaria una sonda, o "scope", collegata alla variabile della quale si vuole osservare l'evoluzione. Le scopes sono disponibili nel menu "sinks".

☐ E' necessario impiegare un sensore diverso a seconda della natura e dell'unità di misura della variabile della quale si vuole osservare l'evoluzione.

■ Nessuna delle altre risposte proposte è corretta

☐ E' necessario un oscilloscopio, rappresentato dal blocco "oscilloscope", collegato alla variabile della quale si vuole osservare l'evoluzione. Tale blocco è disponibile nel menu "sinks".

Oppure se c'è è questa la giusta:
E' necessario un oscilloscopio, rappresentato dal blocco "scope", collegato alla variabile della quale si vuole osservare l'evoluzione. Tale blocco è disponibile nel menu "sinks".

Lezione 063

01. **Quale delle seguenti affermazioni è corretta con riferimento ai blocchi SIMULINK che modellano discontinuità?**

☐ Il blocco Backlash modella la discontinuità dovuta alla presenza di una zona morta, il blocco Relay modella componenti di tipo relé, il blocco Saturation modella le isteresi, il blocco Quantized simula la presenza di una quantizzazione.

■ Il blocco Backlash modella le isteresi, il blocco Relay modella componenti di tipo relé, il blocco Saturation riproduce elementi che presentano una saturazione, il blocco Quantized simula la presenza di una quantizzazione.

☐ Nessuna delle altre risposte proposte è corretta

☐ Il blocco Backlash modella la discontinuità dovuta alla presenza di una zona morta, il blocco Relay modella le isteresi, il blocco Saturation modella componenti di tipo relé, il blocco Quantized simula la presenza di una quantizzazione.

02. **Quali dei seguenti sono blocchi SIMULINK che rappresentano elementi continui di uno schema a blocchi?**

■ Integrator, Derivative, State-Space, Transfer Fcn, Zero-Pole, Transport Delay.

☐ Constant, Scope, Sine Wave, Signal Generator, Relay.

☐ Dead Zone, Backlash, Relay, Saturation, Quantizer.

☐ Nessuna delle altre risposte proposte è corretta

Lezione 064

01. Quali dei seguenti sono blocchi SIMULINK che rappresentano operazioni matematiche?

☐ Nessuna delle altre risposte proposte è corretta

■ Abs, Dot Product, Rounding Function, Gain, Math Function, MinMax, Sign, Vector Concatenate.

☐ Discrete Derivative, Discrete-Time Integrator, Discrete State-Space, Discrete Transfer Fcn, Discrete Zero-Pole, Zero-Order Hold, First-Order Hold, Unit Delay, Weighted Moving Average.

☐ Dead Zone, Backlash, Relay, Saturation, Quantizer.

02. Quali dei seguenti sono blocchi SIMULINK che rappresentano elementi discreti di uno schema a blocchi?

■ Discrete Derivative, Discrete-Time Integrator, Discrete State-Space, Discrete Transfer Fcn, Discrete Zero-Pole, Zero-Order Hold, First-Order Hold, Unit Delay, Weighted Moving Average.

☐ Nessuna delle altre risposte proposte è corretta

☐ Abs, Dot Product, Rounding Function, Gain, Math Function, MinMax, Sign, Vector Concatenate.

☐ Integrator, Derivative, State-Space, Transfer Fcn, Zero-Pole, Transport Delay, ZOH, FOH.

Lezione 065

01. Quali dei seguenti sono blocchi SIMULINK che rappresentano elementi pozzo?

- [ ] Dead Zone, Backlash, Relay, Saturation, Quantizer.
- [ ] Band-Limited White Noise, Chirp Signal, Constant, Pulse Generator, Sine Wave, Random Number, From File, From Workspace, Step, Ramp, Signal Generator.
- [ ] Nessuna delle altre risposte proposte è corretta
- [x] Scope, Display, XY Graph, To File, To Workspace.

02. In quale libreria di SIMULINK sono contenuti i multiplexer e i demultiplexer?

- [ ] Libreria Lookup Tables.
- [ ] Nessuna delle altre risposte proposte è corretta
- [x] Libreria Signal Routing.
- [ ] Libreria Logic and Bit Operations.

03. Quali dei seguenti sono blocchi SIMULINK che rappresentano elementi sorgente?

- [ ] Dead Zone, Backlash, Relay, Saturation, Quantizer.
- [x] Band-Limited White Noise, Chirp Signal, Constant, Pulse Generator, Sine Wave, Random Number, From File, From Workspace, Step, Ramp, Signal Generator.
- [ ] Nessuna delle altre risposte proposte è corretta
- [ ] Scope, Display, XY Graph, To File, To Workspace.

Lezione 066

01. Qual è l'istruzione corretta che consente il tracciamento del luogo delle radici in MATLAB?

☐ [r, k] =root_locus(num, denom); calcola e disegna il luogo delle radici di un sistema SISO ad anello aperto, restituendo il vettore k dei guadagni selezionati e i valori delle radici in corrispondenza di tali guadagni nel vettore r.

■ [r, k] =rlocus(num, denom); calcola e disegna il luogo delle radici di un sistema SISO ad anello aperto, restituendo il vettore k dei guadagni selezionati e i valori delle radici in corrispondenza di tali guadagni nel vettore r.

☐ Nessuna delle altre risposte proposte è corretta

☐ [r, k] =root(sys); calcola e disegna il luogo delle radici di un sistema SISO ad anello aperto, restituendo il vettore k dei guadagni selezionati e i valori delle radici in corrispondenza di tali guadagni nel vettore r.

Lezione 067

01. Qual è in generale (anche in MATLAB) il verso corretto di lettura del luogo delle radici?

- [x] Il luogo negativo si legge dagli asintoti o dagli zeri verso i poli, il luogo positivo si legge dai poli verso gli zeri o verso gli asintoti.
- [ ] Il luogo positivo si legge dagli asintoti o dagli zeri verso i poli, il luogo negativo si legge dai poli verso gli zeri o verso gli asintoti.
- [ ] Nessuna delle altre risposte proposte è corretta
- [ ] Il luogo negativo si legge dagli asintoti o dai poli verso gli zeri, il luogo positivo si legge dai zeri verso i poli o verso gli asintoti.

02. Si riporti un esempio di sintesi di controllore attraverso l'ispezione del luogo delle radici.

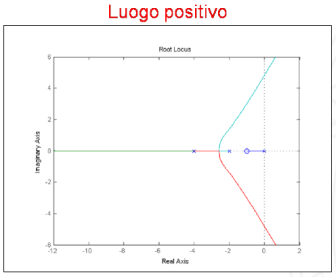
Esempio 1 (1/4)

Determinare se esistono valori del parametro k affinché il sistema a controreazione unitaria negativa con funzione di trasferimento ad anello aperto seguente:

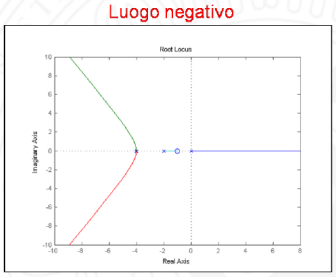
$$P(s) = \frac{s+1}{s(s+2)(s+4)^2}$$

$$P(s) = \frac{s+1}{s(s+2)(s+4)^2}$$

Luogo positivo



Luogo negativo

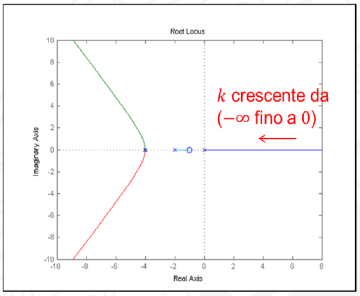


Il **luogo negativo** si legge dagli asintoti o dagli zeri verso i poli.

Analizzando tale luogo, notiamo come non esiste alcun valore $k < 0$ tale per cui tutte le radici del denominatore della funzione di trasferimento ad anello chiuso siano a parte reale negativa.

Infatti, per $k \in (-\infty, 0)$, esiste una radice che rimane nel semipiano destro.

Luogo negativo

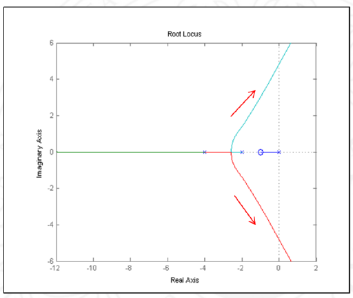


Il **luogo positivo** si legge dai poli verso gli zeri o verso gli asintoti.

Analizzando il luogo positivo, notiamo come per $k > 0$ i poli assumono tutti parte reale negativa, purché tale parametro non sia troppo elevato.

Per un valore di k troppo elevato, infatti, vediamo i due rami (celeste e rosso obliqui) tornare nel semipiano destro.

Luogo positivo



Lezione 068

01. Quale delle seguenti affermazioni è corretta con riferimento all'istruzione bode di MATLAB?

☐ bode(sys) restituisce, senza disegnare i diagrammi, i valori dei moduli, delle fasi e le relative pulsazioni in corrispondenza delle quali moduli e fasi sono stati calcolati.

☐ bode (sys, w) restituisce, senza disegnare i diagrammi, i valori dei moduli, delle fasi e le relative pulsazioni in corrispondenza delle quali moduli e fasi sono stati calcolati.

■ [mag, phase, wout] = bode(sys) restituisce, senza disegnare i diagrammi, i valori dei moduli (vettore mag), delle fasi (vettore phase) e le relative pulsazioni (vettore wout) in corrispondenza delle quali moduli e fasi sono stati calcolati.

☐ Nessuna delle altre risposte proposte è corretta

02. Quale delle seguenti affermazioni è corretta con riferimento alla rappresentazione dei diagrammi di Bode che viene restituita da MATLAB attraverso l'istruzione "bode"?

☐ Sia il diagramma dei moduli che il diagramma delle fasi sono funzione della pulsazione omega, che varia da meno infinito a 0.

■ Il diagramma dei moduli riporta il logaritmo in base 10 del modulo della risposta armonica, moltiplicato per 20. Il modulo è pertanto espresso in decibel. Il diagramma delle fasi riporta l'argomento (o fase) della risposta armonica in radianti o gradi.

☐ Il diagramma dei moduli riporta l'argomento (o modulo) della risposta armonica in radianti o gradi. Il diagramma delle fasi riporta il logaritmo in base 10 della fase della risposta armonica, moltiplicato per 20.

☐ Nessuna delle altre risposte proposte è corretta

Lezione 069

01. In caso di guadagno negativo nella funzione di trasferimento del sistema ad anello aperto del quale si desidera tracciare il diagramma di Bode, in cosa si discosta l'istruzione bode di MATLAB rispetto alle regole per il tracciamento manuale?

☐ Non ci sono differenze tra il diagramma di Bode tracciato da MATLAB mediante l'istruzione bode e le regole per il tracciamento manuale.

☐ La presenza di un guadagno negativo comporta un termine costante di fase pari a - 180°, che va a sommarsi al resto. Le regole per il tracciamento manuale prevedono invece un contributo pari a + 180° in caso di guadagno negativo.

■ La presenza di un guadagno negativo comporta un termine costante di fase pari a + 180°, che va a sommarsi al resto. Le regole per il tracciamento manuale prevedono invece un contributo pari a - 180° in caso di guadagno negativo.

☐ Nessuna delle altre risposte proposte è corretta

Lezione 070

01. Quale delle seguenti affermazioni è corretta con riferimento al calcolo dei margini di stabilità in MATLAB?

[x] I valori del margine di guadagno (Gm) e della pulsazione (Wcg) alla quale viene calcolato ed i valori del margine di fase (Pm) e della pulsazione di attraversamento (Wcp) possono essere salvati in quattro corrispondenti variabili applicando il comando margin con la sintassi: [Gm, Pm, Wcg, Wcp] = margin(sys);

[ ] L'istruzione bode(sys), oltre a visualizzare i diagrammi di Bode, visualizza anche i margini di guadagno e di fase.

[ ] Nessuna delle altre risposte proposte è corretta

[ ] Non esiste un'istruzione che consenta a MATLAB di calcolare i margini di stabilità: questi ultimi devono essere calcolati manualmente a seguito del tracciamento dei diagrammi di Bode mediante l'istruzione bode.

Lezione 072

01. Quale delle seguenti affermazioni è corretta con riferimento al diagramma di Nyquist, tracciato sia manualmente sia con MATLAB?

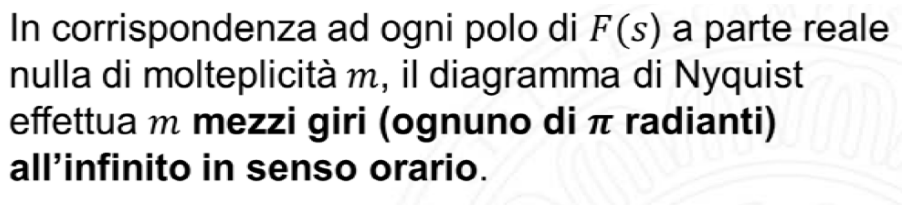
■ In corrispondenza ad ogni polo di F(s) a parte reale nulla con molteplicità m, il diagramma di Nyquist effettua m mezzi giri (ognuno di pigreco radianti) all'infinito in senso orario.

☐ Il tracciamento del diagramma di Nyquist di una F(s) è sempre del tutto indipendente dall'andamento del relativo diagramma di Bode.

☐ In corrispondenza ad ogni polo di F(s) a parte reale nulla con molteplicità m, il diagramma di Nyquist effettua m mezzi giri (ognuno di pigreco radianti) all'infinito in senso antiorario.

☐ Nessuna delle altre risposte proposte è corretta

02. Come si comporta il diagramma di Nyquist in corrispondenza dei poli di F(s) a parte reale nulla?



Lezione 073

01. Quale delle seguenti affermazioni è corretta con riferimento al tracciamento del diagramma di Nyquist in MATLAB?

- [ ] [re, img] = nyquist_diagram(sys) calcola il diagramma di Nyquist e restituisce in re e img i vettori della parte reale e immaginaria della risposta in frequenza.
- [x] nyquist(sys, {wmin wmax}) traccia il diagramma di Nyquist del sistema sys nell'intervallo di frequenze specificato dai valori wmin e wmax.
- [ ] Nessuna delle altre risposte proposte è corretta
- [ ] nyquist_diagram (sys, {wmin wmax}) traccia il diagramma di Nyquist del sistema sys nell'intervallo di frequenze specificato dai valori wmin e wmax.

Lezione 074

01. Quale delle seguenti affermazioni è corretta con riferimento al tracciamento del diagramma di Nyquist in MATLAB?

☐ Se utilizziamo la funzione nyquist1 applicandola a funzioni di trasferimento ad anello aperto con uno o più poli nell'origine, la chiusura all'infinito non viene disegnata.

☐ Se utilizziamo la funzione nyquist2 applicandola a funzioni di trasferimento ad anello aperto con uno o più poli nell'origine, la chiusura all'infinito non viene disegnata.

☐ Nessuna delle altre risposte proposte è corretta

■ Se utilizziamo la funzione nyquist applicandola a funzioni di trasferimento ad anello aperto con uno o più poli nell'origine, la chiusura all'infinito non viene disegnata.

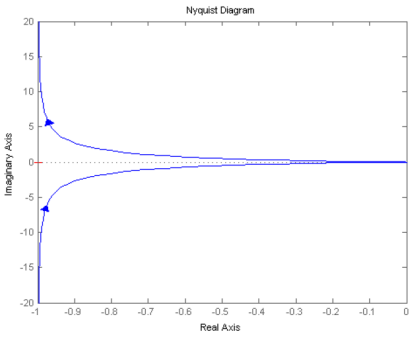
02. Qual è il limite della funzione "nyquist" di MATLAB per cui può essere utile invece ricorrere alla funzione "nyquist1"?

La funzione MATLAB `nyquist` (2/2)

$$F(s) = \frac{1}{s(s+1)}$$

```
sys = tf(1, conv([1 0],[1 1]));
nyquist(sys);
```

La chiusura all'infinito non viene disegnata.



La funzione `nyquist1`

Per venire incontro a questa difficoltà di tracciamento del diagramma di Nyquist della funzione `nyquist` di MATLAB, la community ha sviluppato alcune funzioni open source.

Una di queste è la funzione **`nyquist1`** contenuta nel file `nyquist1.m`, disponibile on-line.

Il link per il download del file è il seguente:

http://ctms.engin.umich.edu/CTMS/index.php?aux=Extras_nyquist1

La sintassi della funzione è simile a quella della funzione `nyquist` di MATLAB. Nelle prossime slide vediamo alcuni esempi.

Lezione 075

01. Quale delle seguenti funzioni è preferibile utilizzare per tracciare il diagramma di Nyquist con MATLAB ai fini dell'applicazione del criterio di Nyquist per valutare la stabilità del sistema ad anello chiuso?

- [x] nyquist1
- [ ] nyquist2
- [ ] nyquist
- [ ] Nessuna delle altre risposte proposte è corretta

Lezione 078

01. Si mostri un esempio di utilizzo congiunto di reti anticipatici e attenuatrici ai fini della sintesi di un sistema di controllo a controreazione unitaria.

Lezione 079

01. Quale delle seguenti affermazioni è corretta con riferimento al problema della modellistica e della simulazione?

☐ I ritardi temporali sono quasi sempre trascurabili nella modellistica di sistemi fisici.

☐ La trasmissione di un segnale da sorgente a destinazione è sempre istantanea nei sistemi fisici.

☐ Nessuna delle altre risposte proposte è corretta

■ Un segnale per essere trasmesso da sorgente a destinazione comporta un'attività di elaborazione, adattamento, etc. Questa richiede un tempo non nullo tale da ritardare la ricezione del segnale rispetto all'istante di tempo in cui il segnale è stato generato.

02. Quale delle seguenti descrive la corretta modellizzazione del ritardo nel dominio del tempo?

☐ Nessuna delle altre risposte proposte è corretta

■ Detto u(t) il segnale di ingresso al blocco del ritardo, il segnale y(t) in uscita dallo stesso blocco equivale al segnale di ingresso ritardato di T secondi, cioè y(t) = u(t - T).

☐ Detto u(t) il segnale di ingresso al blocco del ritardo, il segnale y(t) in uscita dallo stesso blocco equivale al segnale di ingresso ritardato di T secondi, cioè y(t) = u(t*T).

☐ Detto u(t) il segnale di ingresso al blocco del ritardo, il segnale y(t) in uscita dallo stesso blocco equivale al segnale di ingresso ritardato di T secondi, cioè y(t) = u(t + T).

03. Quale delle seguenti affermazioni è corretta con riferimento alla presenza di ritardi nella trasmissione dei segnali?

☐ Nessuna delle altre risposte proposte è corretta

☐ In generale, solo il segnale in uscita dal controllore (e non il segnale di misura in uscita dal sensore) è soggetto a ritardi dovuti all'impiego di un canale (o una rete) di TLC.

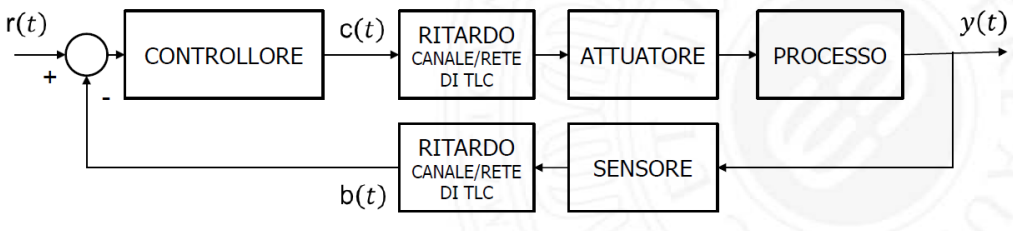
☐ In generale, solo il segnale di misura in uscita dal sensore (e non il segnale in uscita dal controllore) è soggetto a ritardi dovuti all'impiego di un canale (o una rete) di TLC.

■ In generale, sia il segnale in uscita dal controllore, sia il segnale di misura in uscita dal sensore sono soggetti a ritardi dovuti all'impiego di un canale (o una rete) di TLC.

04. Descrivere cosa comporta la presenza di un ritardo nella trasmissione dei segnali e indicare, mediante l'ausilio di uno schema a blocchi, dove generalmente si collocano i ritardi temporali.

Presenza di ritardo nella trasmissione dei segnali

Sia il segnale *c(t)* che il segnale *b(t)* sono soggetti ad un ritardo dovuto alla necessità di collegare il controllore con l'attuatore e il sensore del processo attraverso un canale (o una rete) di telecomunicazione (TLC).



Lezione 080

01. Quale delle seguenti è la funzione di trasferimento ingresso-uscita di un blocco ritardo?

- [ ] F(s) = Y(s)/U(s) = -s*T
- [ ] Nessuna delle altre risposte proposte è corretta
- [ ] F(s) = Y(s)/U(s) = e^(+s*T)
- [x] F(s) = Y(s)/U(s) = e^(-s*T)

02. Quale contributo dà un blocco ritardo al diagramma di Bode?

- [ ] Un contributo in modulo costante e pari a 0 dB e un contributo in fase pari a + omega*T*180/pi.
- [x] Un contributo in modulo costante e pari a 0 dB e un contributo in fase pari a - omega*T*180/pi.
- [ ] Un contributo in modulo costante e pari a 1 dB e un contributo in fase pari a - omega*T*180/pi.
- [ ] Un contributo in modulo costante e pari a 1 dB e un contributo in fase pari a + omega*T*180/pi.

03. Quale delle seguenti descrive la corretta modellizzazione del ritardo nel dominio della variabile complessa s?

- [ ] La trasformata di Laplace del segnale di uscita y(t) = u(t - T) dal blocco di ritardo T è Y(s) = (e^(+s*T))*U(s).
- [ ] Nessuna delle altre risposte proposte è corretta
- [x] La trasformata di Laplace del segnale di uscita y(t) = u(t - T) dal blocco di ritardo T è Y(s) = (e^(-s*T))*U(s).
- [ ] La trasformata di Laplace del segnale di uscita y(t) = u(t - T) dal blocco di ritardo T è Y(s) = -s*T*U(s).

04. Descrivere il comportamento esibito nel dominio della frequenza da un blocco di ritardo temporale.

Per passare al dominio della frequenza (o meglio, della pulsazione ω) imponiamo:

$s = j\omega \in \mathbb{C}$
$\omega \in \mathbb{R}$

$$e^{-sT} = e^{-j\omega T} = cos(-\omega T) + jsin(-\omega T)$$

RAPPRESENTAZIONE POLARE

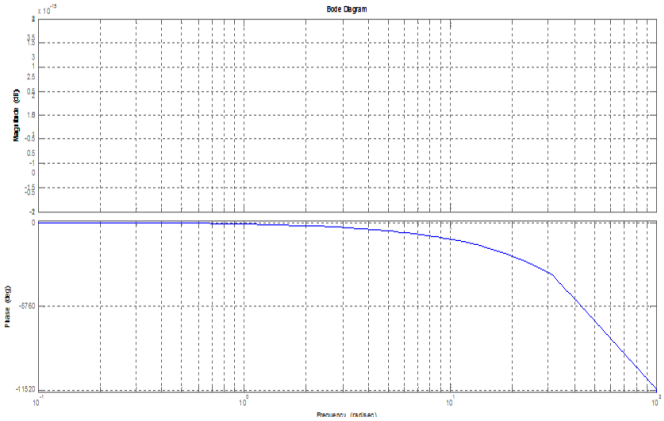
$|e^{-j\omega T}| = 1$ MODULO

$\angle e^{-j\omega T} = -\omega T$ FASE (in radianti)

Ricordando che i diagrammi di Bode tracciano modulo (in decibel) e fase (in gradi) della funzione complessa al variare della ω , in scala logaritmica (x=$\log_{10}\omega$) abbiamo:

$|e^{-j\omega T}|_{dB} = 20\log_{10} 1 = 0$ MODULO (in decibel)

$\angle e^{-j\omega T} = -\frac{180}{\pi} 10^{\log_{10}\omega T}$ FASE (in gradi)

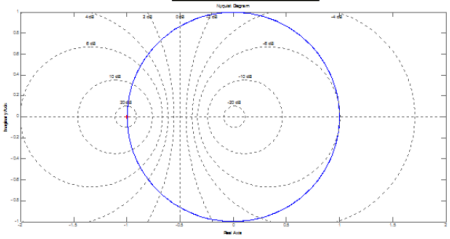


Il diagramma di Nyquist è intuitivo, in quanto si tratta di una circonferenza di raggio unitario che viene percorsa infinite volte in senso antiorario all'aumentare di ω.

RAPPRESENTAZIONE POLARE

$|e^{-j\omega T}| = 1$ MODULO

$\angle e^{-j\omega T} = -\omega T$ FASE (in radianti)



05. Descrivere la modellizzazione del ritardo nel dominio della variabile complessa s.

La causa del ritardo e il suo effetto sono facilmente spiegabili ed analizzabili nel dominio del tempo. Potremmo però chiederci quale sia l'effetto del ritardo nel dominio di Laplace e nel dominio della frequenza.

Come ben sappiamo, per studiare i sistemi dinamici nel dominio di Laplace si applica la trasformata di Laplace.

Prendiamo in considerazione un generico segnale *u(t)*, sappiamo che la sua trasformata di Laplace è definita come:

$$U(s) = \int_{-\infty}^{+\infty} u(t)e^{-st}dt$$

Ma se consideriamo un segnale *u(t)* reale, ovvero nullo per valori non positivi di t, si ha:

$$U(s) = \int_{-}^{+\infty} u(t)e^{-st}dt \qquad u(t) = 0 \,\forall\, t \leq 0$$

Calcoliamo quindi la trasformata di Laplace del segnale di uscita *y(t) = x(t-T)* dal blocco di ritardo T:

$$Y(s) = \int_{-\infty}^{+\infty} y(t)e^{-st}dt = \int_{-\infty}^{+\infty} u(t-T)e^{-st}dt = \int_{T^-}^{+\infty} u(t-T)e^{-st}dt$$

Facciamo una sostituzione di variabile di integrazione:

$$\tau = t - T \;\rightarrow t = \tau + T \;\rightarrow dt/d\tau = 1 \;\rightarrow dt = d\tau$$

Da cui si ricava che:

$$Y(s) = \int_{0^-}^{+\infty} u(\tau)e^{-s(\tau+T)}d\tau = e^{-sT}\int_{0^-}^{+\infty} u(\tau)e^{-s\tau}d\tau = e^{-sT}U(s)$$

$$\boxed{Y(s) = e^{-sT}U(s)}$$

Ne consegue che la funzione di trasferimento ingresso-uscita di un blocco ritardo è data dalla seguente funzione complessa non lineare:

$$\boxed{F(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = e^{-sT}}$$

CONSIDERAZIONE

È bene ricordare che l'esponenziale complesso è esprimibile come una serie:

$$e^{-sT} = \sum_{n=0}^{+\infty} \frac{(-sT)^n}{n!}$$

Pertanto esso è rappresentabile come un polinomio della variabile complessa s di grado infinito.

La funzione e^{-sT} è una funzione complessa di variabile complessa s:

$$s = Re(s) + jIm(s) = \sigma + j\omega \in \mathbb{C}$$
$$\sigma \in \mathbb{R}, \omega \in \mathbb{R}$$

$$e^{-sT} = e^{-(\sigma+j\omega)T} = e^{-\sigma T}e^{-j\omega T} = e^{-\sigma T}[cos(-\omega T) + jsin(-\omega T)]$$

$$\boxed{e^{-sT} = e^{-\sigma T}[cos(\omega T) - jsin(\omega T)]}$$

RAPPRESENTAZIONE CARTESIANA

$$\boxed{Re(e^{-sT}) = e^{-\sigma T}cos(\omega T)}$$ PARTE REALE

$$\boxed{Im(e^{-sT}) = -e^{-\sigma T}sin(\omega T)}$$ PARTE IMMAGINARIA

RAPPRESENTAZIONE POLARE

$$\boxed{|e^{-sT}| = e^{-\sigma T}}$$ MODULO

$$\boxed{\angle e^{-sT} = \omega T}$$ FASE

Lezione 081

01. Descrivere in breve i limiti dei software di simulazione come MATLAB che comportano l'uso di accortezze particolari, per esempio il caso in cui si vuole ricorrere al calcolatore per tracciare il diagramma di Nyquist di un sistema soggetto a ritardo temporale.

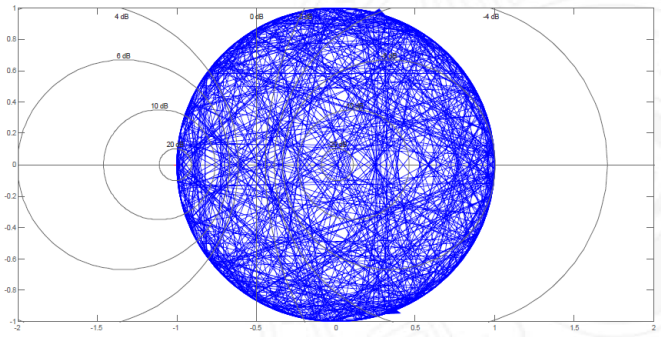
Matlab è un programma software elaborato da un processore digitale che deve necessariamente operare con numeri digitali che hanno un potere espressivo limitato.

Ad esempio, se il sistema gestisce numeri in virgola mobile a 32 bit, potrà necessariamente rappresentare «solo» 2^{32} numeri (poco più di 4 miliardi).

Necessariamente per rappresentare un valore reale con solo 2^{32} elementi, è necessario dividere l'asse reale in 2^{32} segmenti ed associare ad ognuno un rappresentante.

I numeri in virgola mobile hanno il difetto di rappresentare intervalli di valori sempre più grandi. In particolare la dimensione di tali intervalli aumenta esponenzialmente mano a mano che ci si allontana dal valore nullo.

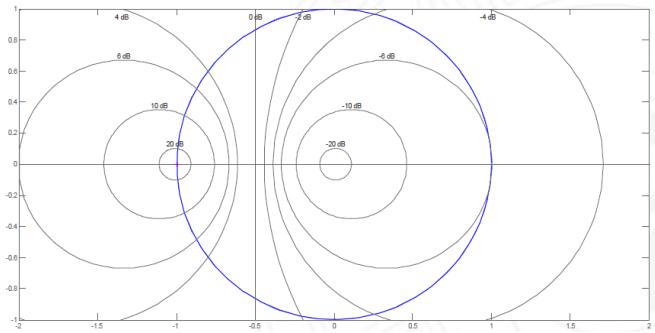
Pertanto mano a mano che la pulsazione cresce in valore assoluto, gli angoli che vengono spazzati lungo la circonferenza aumentano continuamente. Quando tale aumento è piccolo, i segmenti che Matlab traccia tendono a rimanere confinati nella circonferenza. Quando però tale aumento è significativo i segmenti che vengono tracciati dal Matlab «escono» dalla circonferenza e generano un grafico sostanzialmente sbagliato.



SOLUZIONE

Per tracciare quindi un diagramma di Nyquist soddisfacente, si può decidere un valore massimo e minimo della pulsazione. Ad esempio:

```
>> nyquist(delay,{0.01,6.28})
```



Lezione 082

01. Quale delle seguenti è condizione necessaria e sufficiente per la stabilità di un sistema a controreazione unitaria con controllore istantaneo (i.e., guadagno K), ritardo temporale di ampiezza T nella trasmissione del segnale di comando, e processo istantaneo (i.e., guadagno Kp)?

☐ |T*Kp|

☐ |K|

■ Nessuna delle altre risposte proposte è corretta

☐ |K*Kp| $|kk_p| < 1$

Oppure se c'e |K*Kp| <1 è questa la giusta

02. Quale delle seguenti descrive correttamente l'impatto del ritardo sulla stabilità di un sistema LTI a catena aperta preceduto da un ritardo di trasmissione del segnale di comando?

☐ Data una cascata controllore-ritardo-attuatore-processo, non si può determinare a priori l'impatto del blocco ritardo sulla stabilità del sistema a catena aperta. E' necessario verificare preliminarmente se il blocco ritardo è di per sé stabile o meno.

■ Data una cascata controllore-ritardo-attuatore-processo, il blocco ritardo non influisce sulla stabilità del sistema a catena aperta. Quest'ultimo è stabile se e solo se sono stabili tutti gli altri componenti connessi in serie.

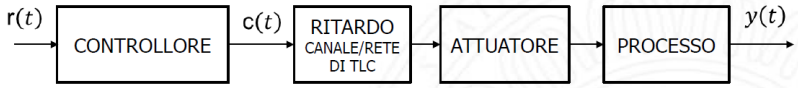
☐ Data una cascata controllore-ritardo-attuatore-processo, la presenza del blocco ritardo determina automaticamente l'instabilità del sistema a catena aperta.

☐ Nessuna delle altre risposte proposte è corretta

03. Cosa si può dire a proposito della stabilità di un sistema a catena aperta costituito dalla cascata controllore - ritardo - attuatore - processo?

Impatto del ritardo

Consideriamo un sistema LTI preceduto da un ritardo di trasmissione del segnale di comando:



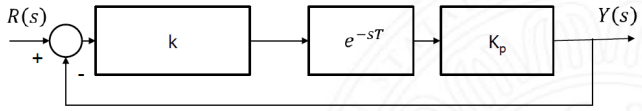
Il sistema nel suo complesso è stabile se e solo se sono stabili tutti gli altri componenti connessi in serie.

Pertanto il blocco ritardo, in un sistema a catena aperta, non influisce sulla stabilità del sistema.

04. Cosa si può dire a proposito della stabilità di un sistema caratterizzato da un processo istantaneo (i.e., P(s)=Kp) affetto da ritardo in ingresso (e.g., e^(-sT)) e controllato mediante uno schema di controllo a controreazione unitaria con controllore proporzionale K?

Stabilità di un sistema del primo ordine

Ipotizziamo di avere un processo istantaneo, K_p, e un ritardo costante, T:



La funzione di trasferimento del sistema in controreazione è del tipo:

$$W(s) = \frac{ke^{-sT}k_p}{1 + ke^{-sT}k_p}$$

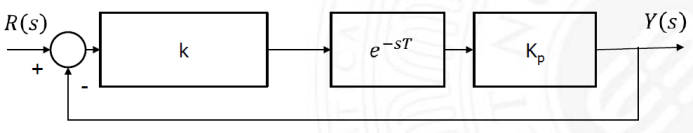
Per studiare la stabilità, conviene studiare la funzione ad anello aperto nel dominio della pulsazione:

$$L(j\omega) = ke^{-j\omega T}k_p$$

È facile tracciare il diagramma di Nyquist, essendo costituito da una circonferenza di raggio $|kk_p|$, centrata nell'origine, che gira in senso orario al crescere della pulsazione ω.

Dato che la funzione d'anello presenta zero poli nell'origine, per il criterio di Nyquist, il sitema controreazionato sarà stabile se e solo se:

$|kk_p| < 1$



© 2016 Università Telematica eCampus - Data Stampa 14/12/2016 15:06:50 - 91/108

Lezione 083

01. Qual è uno schema di controllo più semplice per stabilizzare un processo instabile del primo ordine (i.e., F(s) = 1/(1+tau*s) con tau

☐ Uno schema di controllo a controreazione unitaria con controllore dinamico del secondo ordine e guadagno k

☐ Uno schema di controllo a controreazione unitaria con controllore proporzionale k = (1 - epsilon) ed epsilon > 0 piccolo a piacere.

☐ Uno schema di controllo a controreazione unitaria con controllore dinamico del primo ordine e guadagno k

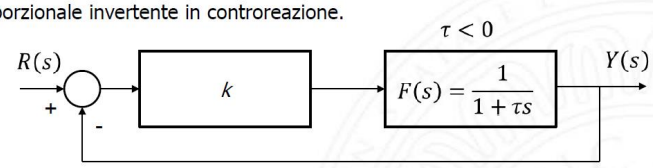
■ Nessuna delle altre risposte proposte è corretta

$$k = -1 - \varepsilon$$

Con $\varepsilon > 0$ piccolo a piacere.

02. Cosa si può dire a proposito della stabilità di un sistema di controllo a controreazione unitaria con processo instabile del primo ordine (i.e., F(s) = 1/(1+tau*s), con tau

È semplice dimostrare che la funzione F(s) è stabilizzabile con un controllore proporzionale invertente in controreazione.



La funzione di trasferimento del sistema in controreazione è:

$$W(s) = \frac{kF(s)}{1 + kF(s)} = \frac{k\frac{1}{1+\tau s}}{1 + k\frac{1}{1+\tau s}} = \frac{k}{1 + \tau s + k}$$

Avente un polo reale:

$$1 + \tau s + k = 0 \leftrightarrow \tau s = -1 - k \leftrightarrow s = \frac{-1-k}{\tau}$$

Imponendo la condizione necessaria (e sufficiente) di stabilità dei sistemi LTI:

$$\frac{-1-k}{\tau} < 0 \leftrightarrow \frac{1+k}{-\tau} < 0$$

Ricordando che $\tau < 0$ ne consegue che il numeratore debba essere negativo:

$$1 + k < 0 \leftrightarrow \boxed{k < -1}$$

Pertanto è sufficiente porre:

$$k = -1 - \varepsilon$$

Con $\varepsilon > 0$ piccolo a piacere.

Lezione 084

01. Si consideri uno schema di controllo a controreazione unitaria con processo instabile del primo ordine (i.e., F(s) = 1/(1+tau*s) con tau < 0), controllore proporzionale k e ritardo T > 0 di trasmissione del segnale di comando, quale delle seguenti affermazioni è corretta?

- [ ] E' possibile garantire la stabilità del sistema controreazionato solo con k
- [ ] Nessuna delle altre risposte proposte è corretta
- [ ] E' possibile garantire la stabilità del sistema controreazionato solo con k
- [x] Non è possibile garantire la stabilità del sistema controreazionato con k

02. Qual è l'effetto del ritardo nella trasmissione del segnale di controllo in un sistema a controreazione unitaria con processo instabile del primo ordine (i.e., F(s) = 1/(1+tau*s), con tau

Non è possibile garantire stabilità al sistema controreazionato, in quanto il criterio di Nyquist non sarà mai soddisfatto, essendo il numero di giri del diagramma di Nyquist della funzione d'anello compiuto sempre in senso orario.

Lezione 085

01. E' richiesto di analizzare un sistema da controllare composto da un serbatoio cilindrico impermeabile, alimentato da un rubinetto. L'obiettivo del sistema controllato è quello di mantenere il livello del liquido nel serbatoio ad un livello costante e prefissato. Quale delle seguenti è corretta?

☐ La variabile di ingresso è il livello h(t) del fluido contenuto nel serbatoio. La variabile di stato è la portata p(t) del rubinetto. La variabile di uscita è la misura della portata p(t) del rubinetto e quindi coincide con la variabile di stato.

☐ Nessuna delle altre risposte proposte è corretta

☐ La variabile di ingresso è la portata p(t) del rubinetto. La variabile di stato è il livello h(t) del fluido contenuto nel serbatoio. La variabile di uscita è arbitraria.

■ La variabile di ingresso è la portata p(t) del rubinetto. La variabile di stato è il livello h(t) del fluido contenuto nel serbatoio. La variabile di uscita è la misura del livello h(t) del fluido contenuto nel serbatoio e quindi coincide con la variabile di stato.

02. Sia dato un sistema da controllare composto da un serbatoio cilindrico impermeabile, alimentato da un rubinetto con portata p(t). L'obiettivo del sistema controllato è quello di mantenere il livello h(t) del liquido nel serbatoio ad un livello costante. La dinamica del sistema è data da (pi*r^2)(dh(t)/dt) = p(t), con r il raggio della base del serbatoio cilindrico. Qual è la funzione di trasferimento del sistema?

☐ F(s) = H(s)/P(s) = (1/(pi*r^2))(1/s^2)

☐ F(s) = H(s)/P(s) = (1/(pi*r^2))(1/(s+1))

■ F(s) = H(s)/P(s) = (1/(pi*r^2))(1/s)

☐ Nessuna delle altre risposte proposte è corretta

03. Quale delle seguenti affermazioni caratterizza correttamente il significato fisico di un polo nell'origine nella funzione di trasferimento di un sistema?

☐ Nessuna delle altre risposte proposte è corretta

☐ La presenza di un polo nell'origine nella funzione di trasferimento significa la presenza di una derivata prima della variabile di uscita nell'equazione differenziale che descrive la dinamica del sistema nel dominio del tempo. Questo è un chiaro segno del fatto che non c'è né accumulo né dissipazione di energia.

■ La presenza di un polo nell'origine nella funzione di trasferimento significa la presenza di una derivata prima della variabile di uscita nell'equazione differenziale che descrive la dinamica del sistema nel dominio del tempo. Questo è un chiaro segno di accumulo di energia.

☐ La presenza di un polo nell'origine nella funzione di trasferimento significa la presenza di una derivata prima della variabile di uscita nell'equazione differenziale che descrive la dinamica del sistema nel dominio del tempo. Questo è un chiaro segno di dissipazione di energia.

04. Sia dato un sistema da controllare composto da un serbatoio cilindrico impermeabile, alimentato da un rubinetto con portata p(t). L'obiettivo del sistema controllato è quello di mantenere il livello h(t) del liquido nel serbatoio ad un livello costante. Sia inoltre il serbatoio dotato di un foro circolare di raggio rf e sia v(t) la velocità del fluido in uscita dal foro. Caratterizzando tale velocità come un disturbo che sottrae energia al sistema e non può essere controllato, quale delle seguenti descrive il significato del relativo contributo alla dinamica del sistema?

■ Essendo v(t) = sqrt(2*g*h(t)), la dinamica del sistema sarà (pi*r^2)(dh(t)/dt) = p(t) - (pi*rf^2)*sqrt(2*g*h(t)). Pertanto, il disturbo rappresenta un elemento di dissipazione di energia.

☐ Essendo v(t) = sqrt(2*g*h(t)), la dinamica del sistema sarà (pi*r^2)(dh(t)/dt) = p(t) - (pi*rf^2)*sqrt(2*g*h(t)). Pertanto, il disturbo rappresenta un elemento di accumulo di energia.

☐ Essendo v(t) = sqrt(2*g*h(t)), la dinamica del sistema sarà (pi*r^2)(dh(t)/dt) = p(t) - (pi*rf^2)*sqrt(2*g*h(t)). Pertanto, il disturbo introduce una nonlinearità istantanea.

☐ Nessuna delle altre risposte proposte è corretta

05. Sia dato un sistema da controllare composto da un serbatoio cilindrico impermeabile, alimentato da un rubinetto con portata p(t). L'obiettivo del sistema controllato è quello di mantenere il livello h(t) del liquido nel serbatoio ad un livello costante. Sia inoltre il serbatoio dotato di un foro circolare di raggio rf e sia v(t) la velocità del fluido in uscita dal foro. Caratterizzando tale velocità come un disturbo che sottrae energia al sistema e non può essere controllato, quale delle seguenti descrive correttamente la dinamica del sistema?

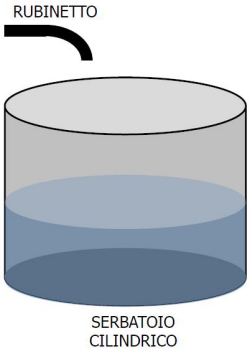
☐ (pi*r^2)(dh(t)/dt) = p(t) + (pi*rf^2)*v(t)

■ (pi*r^2)(dh(t)/dt) = p(t) - (pi*rf^2)*v(t)

☐ (pi*r^2)(dh(t)/dt) = p(t)/v(t)

☐ Nessuna delle altre risposte proposte è corretta

06. Illustrare qual è il significato fisico dei poli della funzione di trasferimento di un sistema attraverso l'esempio del serbatoio cilindrico alimentato da un rubinetto.



L'obiettivo del sistema controllato è quello di mantenere il livello del liquido nel serbatoio ad un livello costante e prefissato.

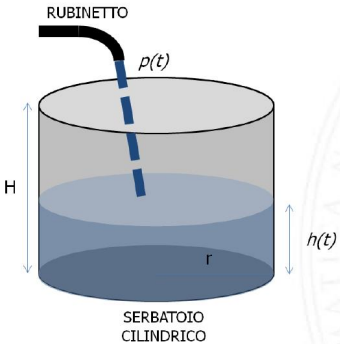
In base all'obiettivo richiesto al sistema da controllare, possiamo subito identificare la struttura del sistema da analizzare.

L'unico elemento in grado di accumulare l'energia immessa attraverso il rubinetto è il serbatoio.

Pertanto l'unico elemento che partecipa attivamente alla dinamica di interesse per il problema di controllo è il serbatoio.

Passiamo a identificare le variabili del sistema

La variabile di ingresso è sicuramente la portata p(t) del rubinetto, in quanto è controllabile ed immette energia nel sistema in esame. Non sono presenti disturbi.



La variabile di stato del sistema è il livello del fluido contenuto nel serbatoio, in quanto è rappresentativa dell'energia accumulata dal serbatoio sotto forma di energia potenziale.

La variabile di uscita, ovvero la variabile da controllare, è proprio la misura del livello h(t) del fluido nel serbatoio e quindi coincide con la variabile di stato.

Pertanto possiamo modellizzare il sistema fisico in esame con il seguente schema a blocchi:

La dinamica del sistema, ovvero la relazione tra la variabile di ingresso p(t) e la variabile controllata, di uscita, h(t) è determinata dalla seguente equazione differenziale:

$$dh = \frac{p(t)}{\pi r^2}dt \quad \rightarrow \quad \pi r^2 \frac{d}{dt}h(t) = p(t)$$

Passando al dominio della variabile complessa s, otteniamo:

$$\pi r^2 H(s)s = P(s)$$

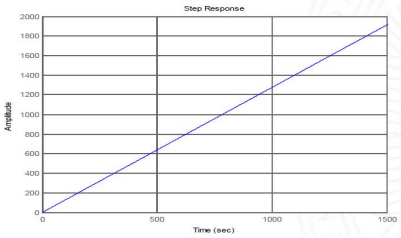
$$F(s) = \frac{H(s)}{P(s)} = \frac{1}{\pi r^2}\frac{1}{s}$$

I limiti di validità di questo modello che descrive la dinamica del sistema, sono per valori del segnale di uscita h(t) < H.

Se ipotizziamo che H è molto grande, che i tempi di osservazione della dinamica sono limitati e che p(t) è sufficientemente piccolo, possiamo ritenere questo modello astratto perfettamente descrittivo della dinamica del sistema.

La funzione di trasferimento presenta un polo nell'origine e questo è in linea con quanto ci aspettavamo. Infatti il sistema ha un unico elemento in grado di accumulare energia utile all'evoluzione del sistema: il contenitore cilindrico. Esso immagazzina l'energia sotto forma di liquido accumulato nel serbatoio che determina un innalzamento del livello del liquido.

La risposta a gradino non può che essere un rampa lineare, con pendenza inversamente proporzionale alla sezione S = πr^2 del cilindro.



In figura è riportata la risposta a gradino unitario nel caso in cui il raggio r sia 0.5 metri.

L'energia viene sempre accumulata e mai dissipata.

È evidente che il sistema è instabile, il transitorio non si estingue mai e il regime permanente non viene mai raggiunto.

Vediamo quindi la relazione tra la dinamica del sistema espressa nel dominio del tempo e nel dominio della variabile complessa s:

$$\pi r^2 \frac{d}{dt}h(t) = p(t)$$

USCITA — INGRESSO

Notiamo che nell'equazione differenziale devono bilanciarsi la derivata prima dell'uscita con il valore istantaneo dell'ingresso. La presenza della sola derivata prima dell'uscita determina, passando nel dominio s, la presenza del polo nell'origine. Infatti:

$$\pi r^2 H(s)s = P(s)$$

Pertanto la funzione di trasferimento F(s) presenterà un polo nell'origine:

$$F(s) = \frac{H(s)}{P(s)} = \frac{1}{\pi r^2}\frac{1}{s}$$

Notiamo che una equazione differenziale che richiede di bilanciare il valore istantaneo della variabile di ingresso con la derivata della variabile di uscita, non può avere una risposta a gradino con regime permanente. Infatti se in presenza di un ingresso a gradino, l'uscita si assestasse asintoticamente ad un valore costante (a regime), la sua derivata sarebbe nulla e l'equazione differenziale costringerebbe l'ingresso ad essere nullo, ma ciò contraddice l'ipotesi iniziale!

La presenza di una derivata prima della variabile di uscita nell'equazione differenziale è pertanto un chiaro segno di accumulo di energia.

Lezione 086

01. Quale delle seguenti affermazioni è corretta con riferimento al significato fisico dei poli?

☐ Nessuna delle altre risposte proposte è corretta

☐ Uno o più poli reali negativi sono significativi di perfetta conservazione dell'energia.

■ Uno o più poli nell'origine sono signifciativi di elementi del sistema che accumulano senza dissipazione di energia e sono quindi causa di instabilità.

☐ Un polo è rappresentativo della capacità del sistema di dissipare energia.

02. Si consideri un sistema composto da due serbatoi interagenti. Il primo serbatoio è alimentatio da un rubinetto. Il secondo serbatoio è alimentato da un foro praticato nel primo serbatoio. L'obiettivo è di controllare il livello del secondo serbatoio, tenendo conto del fatto che anche quest'ultimo è caratterizzato dalla presenza di un foro. Quale delle seguenti affermazioni è corretta?

☐ Nessuna delle altre risposte proposte è corretta

■ Il sistema considerato ha due elementi in grado di accumulare energia, connessi tra di loro attraverso un primo foro che permette ai due elementi di scambiarsi energia in un unico verso. La presenza di un foro nel secondo serbatoio determina la dissipazione dell'energia utile all'evoluzione del sistema e ne garantisce la stabilità intrinseca.

☐ Il sistema considerato ha due elementi in grado di dissipare energia, connessi tra di loro attraverso un primo foro che permette ai due elementi di scambiarsi energia in un unico verso. La presenza di un foro nel secondo serbatoio determina l'accumulo dell'energia utile all'evoluzione del sistema e ne garantisce la stabilità intrinseca.

☐ Il sistema considerato ha due elementi in grado di accumulare energia, connessi tra di loro attraverso un primo foro che permette ai due elementi di scambiarsi energia in un unico verso. Il sistema è intrinsecamente instabile.

03. Quale delle seguenti affermazioni è corretta con riferimento ad un sistema, composto da un serbatoio cilindrico alimentato da un rubinetto di portata p(t), in cui si vuole mantenere il livello h(t) del liquido nel serbatoio ad un livello costante?

☐ Un tale sistema ha un unico elemento in grado di immagazzinare energia, pertanto il suo comportamento dinamico può essere caratterizzato da un solo polo. Se non ci sono dispersioni di energia il polo è centrato nell'origine (i.e., sistema stabile), se invece è presente una dissipazione di energia (e.g., a causa di un foro) il polo è reale e negativo (i.e., sistema instabile).

☐ Un tale sistema ha un unico elemento in grado di dissipare energia, pertanto il suo comportamento dinamico può essere caratterizzato da un solo zero. Se non ci sono dispersioni di energia lo zero è centrato nell'origine (i.e., sistema instabile), se invece è presente una dissipazione di energia (e.g., a causa di un foro) lo zero è reale e negativo (i.e., sistema stabile).

☐ Nessuna delle altre risposte proposte è corretta

■ Un tale sistema ha un unico elemento in grado di immagazzinare energia, pertanto il suo comportamento dinamico può essere caratterizzato da un solo polo. Se non ci sono dispersioni di energia il polo è centrato nell'origine (i.e., sistema instabile), se invece è presente una dissipazione di energia (e.g., a causa di un foro) il polo è reale e negativo (i.e., sistema stabile).

Lezione 087

01. Si consideri un sistema elettrico caratterizzato da un parallelo di un condensatore C e una resistenza R, ai cui capi è disposto un generatore ideale di corrente continua i(t). L'obiettivo è quello di controllare la tensione v(t) ai capi del condensatore. Sia la dinamica del sistema rappresentata dall'equazione i(t) = v(t)/R + C*(dv(t)/dt), qual è la funzione di trasferimento del sistema?

- [ ] F(s) = V(s)/I(s) = R*(1+RCs)
- [ ] Nessuna delle altre risposte proposte è corretta
- [x] F(s) = V(s)/I(s) = R/(1+RCs)
- [ ] F(s) = V(s)/I(s) = RC*(1+Rs)

02. Si consideri un sistema elettrico caratterizzato da un parallelo di un una resistore R, un induttore L ed un condensatore C, ai cui capi è disposto un generatore ideale di corrente continua i(t). L'obiettivo è quello di controllare la tensione v(t) ai capi del condensatore. Qual è la funzione di trasferimento del sistema?

- [x] F(s) = V(s)/I(s) = RLs/(R+Ls+RLCs^2)
- [ ] F(s) = V(s)/I(s) = (R+Ls+RLCs^2)/RLs
- [ ] F(s) = V(s)/I(s) = RL/(R+L+RLCs)
- [ ] Nessuna delle altre risposte proposte è corretta

03. Si consideri un sistema elettrico caratterizzato da un parallelo di un condensatore C e una resistenza R, ai cui capi sia disposto un generatore ideale di corrente continua i(t). L'obiettivo è quello di controllare la tensione v(t) ai capi del condensatore. Qual è l'equazione differenziale che lega la variabile di ingresso i(t) alla variabile di uscita v(t)?

- [x] i(t) = v(t)/R + C*(dv(t)/dt)
- [ ] i(t) = v(t)/RC - RC*(dv(t)/dt)
- [ ] i(t) = v(t)*R + (dv(t)/dt)/C
- [ ] Nessuna delle altre risposte proposte è corretta

04. Si consideri un sistema elettrico caratterizzato da un parallelo di un una resistore R, un induttore L ed un condensatore C, ai cui capi è disposto un generatore ideale di corrente continua i(t). L'obiettivo è quello di controllare la tensione v(t) ai capi del condensatore. Considerando la funzione di trasferimento del sistema F(s) = V(s)/I(s) = RLs/(R+Ls+RLCs^2), quale delle seguenti affermazioni è corretta?

- [ ] Nessuna delle altre risposte proposte è corretta
- [ ] La presenza di uno zero nell'origine è causata dall'azione integrale della resistenza e denota un forzamento transitorio resistivo. Inoltre si nota la presenza di una dissipazione dovuta all'induttanza e di due poli dovute alle due forme di energia accumulabile nel sistema: capacitiva e resistiva.
- [ ] La presenza di uno zero nell'origine è causata dall'azione integrale del condensatore e denota un forzamento transitorio capacitivo. Inoltre si nota la presenza di una dissipazione dovuta al condensatore e di due poli dovute alle due forme di energia accumulabile nel sistema: resistiva e induttiva.
- [x] La presenza di uno zero nell'origine è causata dall'azione integrale dell'induttanza e denota un forzamento transitorio induttivo. Inoltre si nota la presenza di una dissipazione dovuta alla resistenza e di due poli dovute alle due forme di energia accumulabile nel sistema: capacitiva e induttiva.

05. Si consideri un sistema elettrico caratterizzato da un condensatore ai cui capi è disposto un generatore ideale di corrente continua i(t). L'obiettivo è quello di controllare la tensione v(t) ai capi del condensatore. Qual è l'equazione differenziale che lega la variabile di ingresso i(t) alla variabile di uscita v(t)?

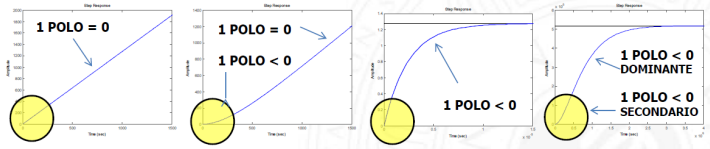
- [x] i(t) = C*(dv(t)/dt)
- [ ] Nessuna delle altre risposte proposte è corretta
- [ ] v(t) = C*(di(t)/dt)
- [ ] i(t) = dq(t)/dt

06. Si consideri un sistema elettrico caratterizzato da un condensatore ai cui capi è disposto un generatore ideale di corrente continua i(t). L'obiettivo è quello di controllare la tensione v(t) ai capi del condensatore. Sia la dinamica del sistema rappresentata dall'equazione i(t) = C*(dv(t)/dt), qual è la funzione di trasferimento del sistema?

- [ ] F(s) = V(s)/I(s) = C*s
- [x] F(s) = V(s)/I(s) = (1/C)*(1/s)
- [ ] Nessuna delle altre risposte proposte è corretta
- [ ] F(s) = V(s)/I(s) = (1/C)*s

07. Mostrare esempi di risposte a gradino di sistemi caratterizzati da un polo dominante nullo (instabile) o a parte reale negativa (stabile) con la presenza o meno di un polo reale a parte reale negativa (stabile) afferente alla dinamica secondaria, mettendo in evidenza il relativo comportamento "energetico" in termini di accumulo/dissipazione.

Finora abbiamo visto esempi di risposte a gradino di sistemi caratterizzati da un polo dominante nullo (instabile) o a parte reale negativa (stabile) con la presenza o meno di un polo reale a parte reale negativa (stabile) afferente alla dinamica secondaria. Potremmo chiederci cosa accade in presenza di due poli complessi coniugati e quale spiegazione fisica è ad essi associata.



ACCUMULO SENZA DISSIPAZIONE
- SISTEMA INSTABILE
- NESSUNA DINAMICA SECONDARIA

ACCUMULO SENZA DISSIPAZIONE
- SISTEMA INSTABILE
- PRESENZA DI UNA DINAMICA SECONDARIA

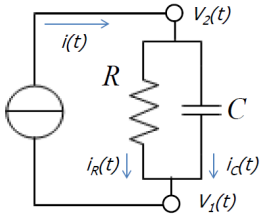
ACCUMULO CON DISSIPAZIONE
- SISTEMA STABILE
- NESSUNA DINAMICA SECONDARIA

ACCUMULO CON DISSIPAZIONE
- SISTEMA STABILE
- PRESENZA DI UNA DINAMICA SECONDARIA

08. Illustrare qual è il significato fisico dei poli della funzione di trasferimento di un sistema attraverso l'esempio di un sistema elettrico.

Significato fisico dei poli – Esempio 2

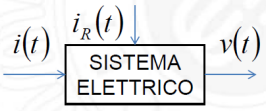
Aggiungiamo quindi un elemento in grado di dissipare energia che stabilizzi il sistema, ovvero un componente che lega istantaneamente corrente e tensione: ovvero una resistenza. Il circuito elettrico diviene:



$$v(t) = v_2(t) - v_1(t)$$

$$i_R(t) = \frac{v(t)}{R}$$

L'unico elemento che può influire sulla dinamica del sistema è il condensatore, mentre la corrente $i_R(t)$ dissipata sulla resistenza è un disturbo prevedibile, in quanto se ne conosce il valore e l'intensità.



L'equazione differenziale che lega la variabile di ingresso alla variabile di uscita si può ricavare applicando la legge di kirchhoff:

$$i(t) = i_R(t) + i_C(t) = \frac{v(t)}{R} + C\frac{d}{dt}v(t)$$

Come atteso, essendo presente una relazione istantanea tra ingresso e uscita, il sistema dissipa energia, ci attendiamo pertanto che il sistema sia stabile ed infatti, passando al dominio di Laplace:

$$I(s) = \frac{1}{R}V(s) + CsV(s) = \left(\frac{1}{R} + Cs\right)V(s) = \frac{1+RCs}{R}V(s)$$

Da cui otteniamo la funzione di trasferimento:

$$\frac{V(s)}{I(s)} = \frac{R}{1+RCs} = \frac{K}{1+\tau s}$$

$K = R$ GUADAGNO STATICO

$\tau = RC$ COSTANTE DI TEMPO

Lezione 088

01. Quale delle seguenti affermazioni è corretta con riferimento all'effetto dei poli e degli zeri?

☐ Nessuna delle altre risposte proposte è corretta

☐ La dinamica di un sistema è interamente determinata dai poli della funzione di trasferimento, mentre gli zeri non influenzano affatto la risposta a gradino.

☐ La dinamica di un sistema è interamente determinata dagli zeri della funzione di trasferimento, mentre i poli influenzano la risposta a gradino come contributi derivativi addizionali rispetto alla risposta a gradino priva di poli.

■ La dinamica di un sistema è interamente determinata dai poli della funzione di trasferimento, mentre gli zeri influenzano la risposta a gradino come contributi derivativi addizionali rispetto alla risposta a gradino priva di zeri.

02. Si consideri un sistema elettrico caratterizzato da un parallelo di un una resistore R, un induttore L ed un condensatore C, ai cui capi è disposto un generatore ideale di corrente continua i(t). L'obiettivo è quello di controllare la tensione v(t) ai capi del condensatore. Considerando la funzione di trasferimento del sistema F(s) = V(s)/I(s) = RLs/(R+Ls+RLCs^2), quale delle seguenti affermazioni è corretta?

☐ Nessuna delle altre risposte proposte è corretta

■ 1) Se L > 4*R^2*C, ci sono due poli reali negativi e quindi il sistema è stabile. 2) Se L = 4*R^2*C, ci sono due poli reali negativi coincidenti e quindi il sistema è stabile. 3) Se L

☐ 1) Se L = 4*R^2*C, ci sono due poli reali negativi e quindi il sistema è stabile. 2) Se L > 4*R^2*C, ci sono due poli reali negativi coincidenti e quindi il sistema è stabile. 3) Se L

☐ 1) Se L < 4*R^2*C, ci sono due poli reali negativi e quindi il sistema è stabile. 2) Se L = 4*R^2*C, ci sono due poli reali negativi coincidenti e quindi il sistema è stabile. 3) Se L > 4*R^2*C, ci sono due poli complessi coniugati a parte reale negativa e quindi il sistema è stabile ma presenterà oscillazioni.

Lezione 089

01. Qual è la descrizione corretta del sistema del pendolo inverso?

■ Nessuna delle altre risposte proposte è corretta

☐ In genere si considera un pendolo inverso su un carrello semovente. La finalità è quella di mantenere in equilibrio orizzontale il pendolo agendo sulla dinamica del carrello semovente. Il carrello può muoversi a destra e a sinistra per mezzo di un motore che agisce sulle ruote.

☐ In genere si considera un pendolo inverso su un carrello semovente. La finalità è quella di mantenere (vicino) all' equilibrio verticale il pendolo agendo sulla dinamica del carrello semovente. Il carrello può muoversi a destra e a sinistra per mezzo di un motore che agisce sulle ruote.

☐ E' analogo al pendolo di Galileo, ma ruotato di 180°, per cui l'obiettivo è di mantenere il pendolo nella condizione di equilibrio verticale instabile.

02. Nel sistema del pendolo inverso, quanto vale l'energia cinetica traslazionale lungo l'asse x?

■ (1/2)*(mp + mc)*(xdot^2), con mp la massa del pendolo inverso ed mc la massa del carrello semovente.

☐ (1/2)*mp*mc*xdot, con mp la massa del pendolo inverso ed mc la massa del carrello semovente.

☐ (1/2)*(mp + mc)*xdot, con mp la massa del pendolo inverso ed mc la massa del carrello semovente.

☐ Nessuna delle altre risposte proposte è corretta

03. Nel sistema del pendolo inverso, quanto vale l'energia cinetica rotazionale?

☐ (1/2)*(1/3*mc*(length^2))*(thetadot^2), con mc la massa del carrello, length la lunghezza del carrello e theta l'angolo che l'oscillazione del carrello descrive rispetto alla verticale.

☐ (1/2)*(thetadot^2), con theta l'angolo che l'oscillazione del pendolo descrive rispetto alla verticale.

■ (1/2)*(1/3*mp*(length^2))*(thetadot^2), con mp la massa del pendolo inverso, length la lunghezza del pendolo e theta l'angolo che l'oscillazione del pendolo descrive rispetto alla verticale.

☐ Nessuna delle altre risposte proposte è corretta

04. Quale delle seguenti affermazioni è corretta con riferimento al moto lungo l'asse y nel sistema del pendolo inverso?

☐ Lungo l'asse y si possono muovere sia il carrello che il pendolo.

☐ Nessuna delle altre risposte proposte è corretta

■ Lungo l'asse y si può muovere solo il pendolo ma non il carrello, essendo il carrello vincolato a muoversi esclusivamente lungo l'asse x.

☐ Lungo l'asse y si può muovere solo il carrello ma non il pendolo, essendo il carrello vincolato a muoversi esclusivamente lungo l'asse y.

05. Quale delle seguenti affermazioni è corretta con riferimento all'energia potenziale del pendolo inverso?

☐ Nessuna delle altre risposte proposte è corretta

☐ L'energia potenziale è massima quando il pendolo è in equilibrio verticale stabile.

■ L'energia potenziale è massima quando il pendolo è in equilibrio verticale instabile.

☐ L'energia potenziale è massima quando il pendolo giace sul carrello (i.e., theta = + pi/2, - pi/2).

06. Nel sistema del pendolo inverso, quanto vale l'energia potenziale?

☐ U = m*g*(length/2), con m la massa dell'intero sistema, length la lunghezza del pendolo.

☐ U = mc*g*(length/4)*cos(theta), con mc la massa del carrello, length la lunghezza del pendolo e theta l'angolo che l'oscillazione del pendolo descrive rispetto alla verticale.

☐ Nessuna delle altre risposte proposte è corretta

■ U = m*g*(length/2)*cos(theta), con m la massa dell'intero sistema, length la lunghezza del pendolo e theta l'angolo che l'oscillazione del pendolo descrive rispetto alla verticale.

07. Nel sistema del pendolo inverso, quanto vale l'energia cinetica traslazionale lungo l'asse y?

☐ (1/2)*mc*(thetadot*l*sin(theta))*(xdot*cos(theta)*sin(theta)), con mc la massa del carrello e theta l'angolo che l'oscillazione del carrello descrive rispetto alla verticale.

■ (1/2)*mp*(thetadot*l*sin(theta))*(xdot*cos(theta)*sin(theta)), con mp la massa del pendolo inverso e theta l'angolo che l'oscillazione del pendolo descrive rispetto alla verticale.

☐ (1/2)*mp*(thetadot*l*sin(theta)), con mp la massa del pendolo inverso e theta l'angolo che l'oscillazione del pendolo descrive rispetto alla verticale

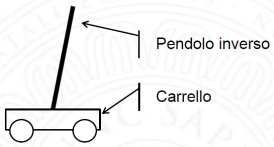
☐ Nessuna delle altre risposte proposte è corretta

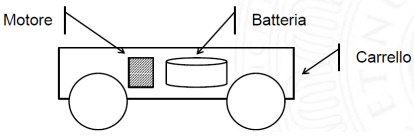
08. Descrivere brevemente la struttura del pendolo inverso su carrello semovente.

Struttura del pendolo inverso

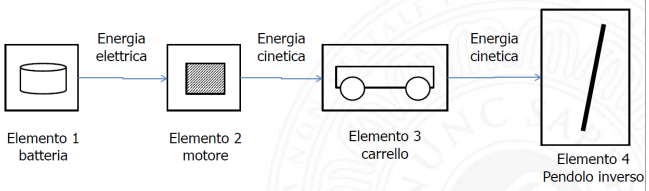
Il sistema da controllare è costituito sicuramente da due elementi:
1. Il pendolo inverso;
2. Il carrello.

Il carrello semovente è costituito a sua volta da:
- Carrello;
- Motore in corrente continua;
- Batteria.





La struttura del sistema pertanto si presenta:



Come si nota dal diagramma degli oggetti, i vari elementi del sistema scambiano differenti forme di energia tra di loro e sono stati presi in considerazione tutti e soli quegli elementi che possono contribuire in maniera determinante all'evoluzione del sistema utile al raggiungimento degli obiettivi: ovvero utile a mantenere il pendolo inverso in condizioni di equilibrio instabile.

09. Descrivere la procedura di calcolo dell'energia cinetica traslazionale, dell'energia cinetica rotazionale e dell'energia potenziale del sistema costituito dal pendolo inverso su carrello semovente.

L'energia cinetica che il sistema in esame può accumulare si manifesta essenzialmente sotto forma di tre possibili contributi:
- L'energia cinetica dovuta alla traslazione dell'intero sistema lungo gli assi x e y;
- L'energia cinetica dovuta alla rotazione del pendolo inverso rispetto al perno che vincola il pendolo inverso sul carrello semovente;
- L'energia potenziale dovuta alla posizione del pendolo rispetto al carrello.

Possiamo esprimere le due forme di energia cinetica con le seguenti equazioni fisiche:

$$T_{traslazione} = \frac{1}{2} m v^2$$

$$T_{rotazione} = \frac{1}{2} I \omega^2$$

m = massa dell'intero sistema
v = velocità dell'intero sistema
I = momento in inerzia del pendolo inverso
ω = velocità angolare del pendolo inverso

L'energia cinetica traslazionale deve tenere conto delle componenti del vettore velocità lungo i due assi cartesiani x e y:

$$T_{traslazione} = \frac{1}{2} m v^2 = \frac{1}{2} m \left(v_x^2 + v_y^2 \right) = \frac{1}{2} m v_x^2 + \frac{1}{2} m v_y^2 = T_x + T_y$$

La massa dell'intero sistema è data dalla somma della massa del pendolo inverso m_p e del carrello semovente m_c. La massa del carrello semovente tiene conto della massa di tutte le parti che lo costituiscono (batteria, motore e carrello). La velocità v, lungo l'asse delle x è pari alla derivata prima della posizione x. Quindi abbiamo:

$$T_x = \frac{1}{2} \left(m_p + m_c \right) \dot{x}^2$$

Notiamo invece che lungo l'asse delle y si può muovere solo il pendolo ma non il carrello, essendo il carrello vincolato a muoversi esclusivamente lungo l'asse delle x.

$$T_y = \frac{1}{2} m_p v_y^2 = \frac{1}{2} m_p \left(\dot{\theta} l \sin\theta \right) \left(\dot{x} \cos\theta \sin\theta \right)$$

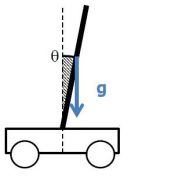
Pertanto:

$$T_{traslazione} = T_x + T_y = \frac{1}{2} \left(m_p + m_c \right) \dot{x}^2 + \frac{1}{2} m_p \dot{\theta} \dot{x} l \cos\theta \left(\sin\theta \right)^2$$

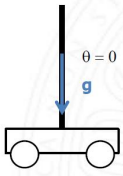
Pertanto l'energia cinetica di rotazione è pari a:

$$T_{rotazione} = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{3} m_p l^2 \right) \dot{\theta}^2$$

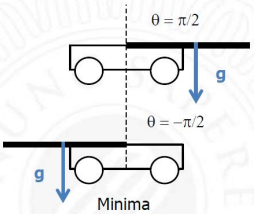
Il pendolo inverso è vincolato al carrello semovente, a seconda della posizione che assume rispetto al carrello, ha ad esso associata una energia potenziale che è massima quando il pendolo è in equilibrio instabile ed è minima quando il pendolo giace sul carrello.



Energia potenziale



Massima energia potenziale



Minima energia potenziale

$$U = mg \frac{l}{2} \cos\theta$$

Lezione 090

01. Quale delle seguenti equazioni differenziali descrive la dinamica angolare del pendolo inverso?

☐ P - G = mp*ydoubledot, con P la spinta del carrello lungo l'asse y, G la forza di gravità e y la componente lungo l'asse y del vettore posizione del centro di massa del pendolo.

☐ N = mp*pdoubledot, con N la spinta del carrello lungo l'asse x, mp la massa del pendolo inverso e p componente sull'asse x del vettore posizione del centro di massa del pendolo.

■ (length/2)*N*cos(theta) - (length/2)*P*sin(theta) = Ip*thetadoubledot, con length la lunghezza del pendolo inverso, N la spinta del carrello lungo l'asse x, P la spinta del carrello lungo l'asse y, theta l'angolo che l'oscillazione del pendolo descrive rispetto alla verticale e Ip il momento d'inerzia del pendolo.

☐ Nessuna delle altre risposte proposte è corretta

02. Quali effetti causano le tre forze esterne agenti sul sistema del pendolo inverso?

☐ Una accelerazione lungo l'asse x, una accelerazione lungo l'asse y, applicate al baricentro.

☐ Una accelerazione angolare applicata al baricentro. Si deve tenere conto pertanto del momento di inerzia del pendolo.

☐ Nessuna delle altre risposte proposte è corretta

■ Una accelerazione lungo l'asse x, una accelerazione lungo l'asse y e una accelerazione angolare, tutte applicate al baricentro.

03. Quale delle seguenti descrive correttamente la posizione del centro di massa del pendolo inverso sul carrello?

☐ p(t) = (length/2)*cos(theta(t)), y(t) = x(t) + (length/2)*sin(theta(t)), con length la lunghezza del pendolo e theta l'angolo che l'oscillazione del pendolo descrive rispetto alla verticale.

☐ Nessuna delle altre risposte proposte è corretta

☐ p(t) = (length/2)*sin(theta(t)), y(t) = (length/4)*cos(theta(t)), con length la lunghezza del pendolo e theta l'angolo che l'oscillazione del pendolo descrive rispetto alla verticale.

■ p(t) = x(t) + (length/2)*sin(theta(t)), y(t) = (length/2)*cos(theta(t)), con length la lunghezza del pendolo e theta l'angolo che l'oscillazione del pendolo descrive rispetto alla verticale.

04. Quali sono le forze esterne agenti sul sistema del pendolo inverso considerato nel corso?

☐ Nessuna delle altre risposte proposte è corretta

☐ Gravità, attrito viscoso nelle oscillazioni del pendolo e attrito viscoso che si oppone al moto del carrello.

■ Gravità, spinta del carrello lungo l'asse x, spinta del carrello lungo l'asse y e un eventuale attrito che si oppone al moto orizzontale del carrello.

☐ Gravità, attrito viscoso nelle oscillazioni del pendolo.

05. Come si calcola la funzione Lagrangiana con riferimento al sistema del pendolo inverso?

☐ L(x,theta) = energia cinetica traslazionale + energia cinetica rotazionale + energia potenziale.

☐ L(x,theta) = energia cinetica traslazionale - energia potenziale.

☐ Nessuna delle altre risposte proposte è corretta

■ L(x,theta) = energia cinetica traslazionale + energia cinetica rotazionale - energia potenziale.

06. Illustrare come la teoria delle piccole oscillazioni consente di ricavare il modello dinamico del sistema costituito dal pendolo inverso su carrello semovente.

07. Illustrare come, mediante il bilanciamento delle forze e dei momenti (in alternativa alla teoria delle piccole oscillazioni), è possibile ricavare il modello dinamico del sistema costituito dal pendolo inverso su carrello semovente.

Lezione 091

01. Quale delle seguenti affermazioni è corretta con riferimento al comportamento di stabilità del sistema del pendolo inverso?

☐ Il sistema del pendolo inverso rimane stabile rispetto alla perturbazione di un ingresso costante, mentre è portato in condizioni di instabilità dalla perturbazione di un ingresso impulsivo.

☐ Il sistema del pendolo inverso rimane stabile rispetto alla perturbazione di un ingresso impulsivo, mentre è portato in condizioni di instabilità dalla perturbazione di un ingresso costante.

■ Il sistema del pendolo inverso è instabile: qualsiasi forma di energia fornita al sistema (impulsiva o costante) lo perturba e lo porta in condizioni di instabilità.

☐ Nessuna delle altre risposte proposte è corretta

02. Cosa accade quando il sistema del pendolo inverso è fermo, in equilibrio instabile e viene perturbato con una spinta costante (risposta a gradino unitario)?

☐ Dopo un intervallo di tempo iniziale durante il quale l'angolo theta oscilla intorno alla verticale, esso si assesta sul valore theta=0 dando luogo ad un comportamento stabile.

☐ Dopo un iniziale tempo di ritardo in cui il sistema accumula energia, l'angolo theta oscilla continuamente intorno alla verticale con ampiezza costante, come un metronomo.

☐ Nessuna delle altre risposte proposte è corretta

■ Dopo un iniziale tempo di ritardo in cui il sistema accumula energia, l'angolo theta diventa negativo e va ben oltre le specifiche a causa della natura instabile della condizione di equilibrio di partenza.

03. Quale delle seguenti è la struttura corretta della funzione di trasferimento del sistema del pendolo inverso, una volta effettuata l'approssimazione per piccole oscillazioni intorno al punto di equilibrio instabile theta=0?

☐ F(s) = theta/U = 1/(c*s^2 + d*s + e), dove la spinta del motore U è l'ingresso e l'angolo theta di oscillazione del pendolo rispetto alla verticale è l'uscita.

■ F(s) = theta/U = as/(c*s^3 + d*s^2 + e*s + f), dove la spinta del motore U è l'ingresso e l'angolo theta di oscillazione del pendolo rispetto alla verticale è l'uscita.

☐ F(s) = theta/U = as/(c*s^2 + d*s + e), dove la spinta del motore U è l'ingresso e l'angolo theta di oscillazione del pendolo rispetto alla verticale è l'uscita.

☐ Nessuna delle altre risposte proposte è corretta

04. Quali ipotesi si fanno quando si sceglie di effettuare un approssimazione del pendolo inverso per piccole oscillazioni intorno al punto di equilibrio instabile theta=0?

☐ theta=pi, sin(theta)=0, cos(theta)=-1

☐ Nessuna delle altre risposte proposte è corretta

☐ theta=pi/2, sin(theta)=1, cos(theta)=0

■ theta=0, sin(theta)=theta, cos(theta)=1

05. Cosa accade quando il sistema del pendolo inverso è fermo, in equilibrio instabile e viene perturbato con un impulso (risposta all'impulso)?

■ Dopo un iniziale tempo di ritardo in cui il sistema accumula energia, l'angolo theta diventa negativo e va ben oltre le specifiche a causa della natura instabile della condizione di equilibrio di partenza.

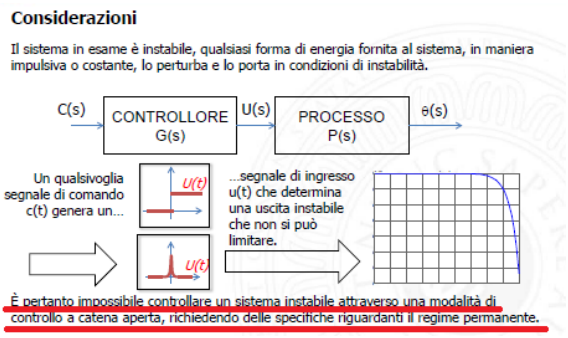
☐ Nessuna delle altre risposte proposte è corretta

☐ Dopo un intervallo di tempo iniziale durante il quale l'angolo theta oscilla intorno alla verticale, esso si assesta sul valore theta=0 dando luogo ad un comportamento stabile.

☐ Dopo un iniziale tempo di ritardo in cui il sistema accumula energia, l'angolo theta oscilla continuamente intorno alla verticale con ampiezza costante, come un metronomo.

06. Illustrare come si effettua l'approssimazione per piccole oscillazioni, attorno al punto di equilibrio instabile, del modello dinamico nonlineare del pendolo inverso su carrello e ricavare la corrispondente funzione di trasferimento mediante trasformata di Laplace.

07. E' possibile il controllo a catena aperta del pendolo inverso su carrello, richiedendo specifiche riguardanti il regime permanente? Spiegare perché è possibile oppure no.



Lezione 092

01. Supponendo di utilizzare un regolatore PID con fdt G(s) = Kp + Ki/s + Kd*s per stabilizzare il sistema del pendolo inverso soggetto ad un disturbo sull'angolo theta, qual è la condizione necessaria e sufficiente affinché il sistema a catena chiusa sia stabile?

- [ ] K*Ki
- [ ] K*Ki - 1
- [ ] K*Ki + 1 Oppure se c'è K*Ki+1 <0 è questa la giusta
- [x] Nessuna delle altre risposte proposte è corretta

02. Per quale motivo un regolatore PID consente di stabilizzare il pendolo inverso soggetto ad un disturbo sull'angolo theta?

- [ ] Perché un regolatore PID elimina l'effetto dovuto al derivatore mediante il polo nell'origine.
- [ ] Nessuna delle altre risposte proposte è corretta
- [x] Perché un regolatore PID ha una funzione di trasferimento in grado di modificare la posizione dei poli nella funzione di trasferimento a catena chiusa, inducendo così la stabilità del sistema.
- [ ] Perché un regolatore PID modifica lo zero che causa l'instabilità del sistema a catena aperta e del sistema a catena chiusa.

03. Supponendo di provare a stabilizzare il pendolo inverso con uno schema di controllo a catena chiusa con controllore proporzionale Kg, in presenza di un disturbo agente direttamente sull'angolo theta del pendolo, quanto vale la funzione di trasferimento disturbo-uscita?

- [ ] Y(s)/D(s) = P(s)/(1+Kg*P(s)), dove P(s) è la funzione di trasferimento del processo.
- [ ] Y(s)/D(s) = 1/(1+Kg).
- [x] Y(s)/D(s) = 1/(1+Kg*P(s)), dove P(s) è la funzione di trasferimento del processo.
- [ ] Nessuna delle altre risposte proposte è corretta

04. Quale delle seguenti affermazioni è corretta con riferimento all'effetto di disturbi sul sistema del pendolo inverso?

- [ ] Nessuna delle altre risposte proposte è corretta
- [ ] La stabilità del sistema è robusta rispetto alla presenza di disturbi.
- [ ] Non tutte le tipologie di disturbo portano il sistema a funzionare in condizioni di instabilità.
- [x] Essendo il sistema di per sé instabile, la presenza di un disturbo è fatale e porta sempre il sistema a funzionare in condizioni di instabilità.

05. Cos'è un PID?

- [ ] E' un tipo di PLC specializzato per il controllo di elementi singoli.
- [x] E' un controllore di tipo proporzionale, integrale e derivativo. Un controllore per il quale cioè l'azione di controllo è la somma di contributi, rispettivamente, proporzionali all'errore, all'integrale dell'errore e alla derivata dell'errore.
- [ ] Nessuna delle altre risposte proposte è corretta
- [ ] E' un controllore di tipo proporzionale, integrale e derivativo. Un controllore per il quale cioè l'errore di controllo è pari alla somma di contributi, rispettivamente, proporzionali all'azione di controllo, all'integrale dell'azione di controllo e alla derivata dell'azione di controllo.

06. E' possibile stabilizzare il sistema del pendolo inverso, soggetto ad un disturbo sull'angolo theta, attraverso uno schema di controllo a controreazione unitaria con controllore proporzionale?

- [ ] E' possibile solo nel caso in cui i parametri del processo rientrino in opportuni limiti fissati a priori.
- [x] No.
- [ ] Nessuna delle altre risposte proposte è corretta
- [ ] Sì.

07. E' possibile stabilizzare il sistema del pendolo inverso, soggetto ad un disturbo sull'angolo theta, attraverso uno schema di controllo a controreazione unitaria con controllore solo integrale k/s?

- [x] No.
- [ ] Nessuna delle altre risposte proposte è corretta
- [ ] E' possibile solo nel caso in cui i parametri del processo rientrino in opportuni limiti fissati a priori.
- [ ] Sì.

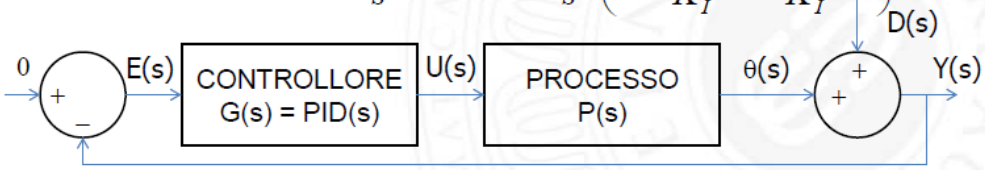
08. Per quale motivo un controllore dotato di sola azione integrale non consente di stabilizzare il pendolo inverso soggetto ad un disturbo sull'angolo theta?

- ☐ Nessuna delle altre risposte proposte è corretta
- ■ Perché un controllore dotato di sola azione integrale non modifica il polo che causa l'instabilità del sistema a catena aperta e del sistema a catena chiusa.
- ☐ Perché un controllore dotato di sola azione integrale non modifica lo zero che causa l'instabilità del sistema a catena aperta e del sistema a catena chiusa.
- ☐ Perché un controllore dotato di sola azione integrale elimina l'effetto dovuto al derivatore mediante il polo nell'origine.

09. Spiegare qual è il controllore opportuno per conseguire la stabilizzazione a catena chiusa del pendolo invertito su carrello, in presenza di un disturbo applicato all'angolo di oscillazione del pendolo.

Bisogna pertanto scegliere un controllore che abbia una funzione di trasferimento in grado di influenzare la posizione dei poli nella funzione di trasferimento a catena chiusa.
Applichiamo pertanto un metodo di sintesi diretta, introducendo un regolatore PID.

$$G(s) = PID(s) = K_P + \frac{K_I}{s} + K_D s = \frac{K_I}{s}\left(1 + \frac{K_P}{K_I}s + \frac{K_D}{K_I}s^2\right)$$



Lezione 093

01. Supponendo di voler stabilizzare il pendolo inverso con uno schema di controllo a catena chiusa, in presenza di un disturbo agente sulla spinta del carrello semovente, quanto vale la funzione di trasferimento disturbo-uscita?

- [x] theta(s)/D(s) = P(s)/(1+L(s)), dove P(s) è il processo da controllare e L(s) è il guadagno di anello.
- [ ] Nessuna delle altre risposte proposte è corretta
- [ ] theta(s)/D(s) = P(s)/(1+P(s)), dove P(s) è il processo da controllare.
- [ ] theta(s)/D(s) = 1/(1+L(s)), dove L(s) è il guadagno di anello.

02. E' possibile stabilizzare il sistema del pendolo inverso, soggetto ad un disturbo agente sulla spinta del carrello semovente, attraverso uno schema di controllo a controreazione unitaria che utilizzi un regolatore PID G(s) = (Kg/s)*(1 + mi*s)(1 + gamma*s)?

- [ ] Nessuna delle altre risposte proposte è corretta
- [x] Sì, solo per un valore sufficientemente alto di Kg.
- [ ] Sempre.
- [ ] Mai.

03. E' possibile stabilizzare il sistema del pendolo inverso, soggetto ad un disturbo agente sulla spinta del carrello semovente, attraverso uno schema di controllo a controreazione unitaria con controllore puramente proporzionale?

- [ ] Nessuna delle altre risposte proposte è corretta
- [x] No.
- [ ] Sì.
- [ ] E' possibile solo nel caso in cui i parametri del processo rientrino in opportuni limiti fissati a priori.

04. Spiegare qual è il controllore opportuno per conseguire la stabilizzazione a catena chiusa del pendolo invertito su carrello, in presenza di un disturbo applicato al carrello.

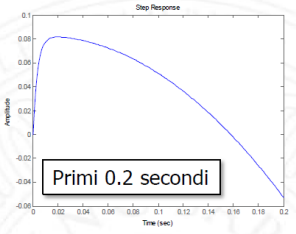
Considerazioni aggiuntive

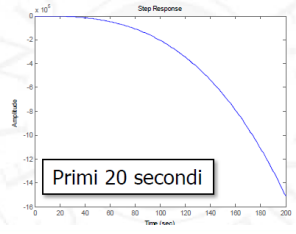
Quando si applica un disturbo a gradino, inizialmente il carrello subisce il contraccolpo, e quindi si sposta in avanti.

Nei primi istanti il PID entra in azione e inizia a trascinare il carrello semovente applicando un forzamento transitorio per contrapporsi alla caduta del pendolo. Il forzamento è costantemente crescente per opporsi all'attrito che aumenta all'aumentare della velocità del carrello.

Il carrello quindi è soggetto ad una forza costantemente crescente che lo porta ad accelerare costantemente e ciò per opporsi sia all'inclinazione forzata del pendolo, sia alla forza di attrito viscoso. Ciò significa che il regolatore PID può controllare il pendolo inverso solo se il carrello può muoversi per una lunghezza e ad una velocità infinitamente ampie.

Questo ovviamente non è possibile per motivi legati ai vincoli energetici e strutturali del problema.





Uso del regolatore PID

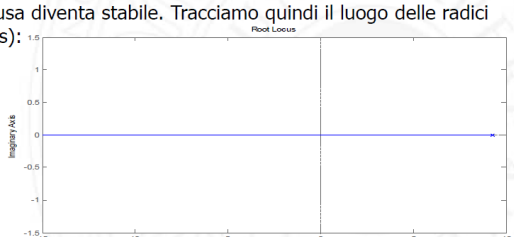
Notiamo che abbiamo avuto una cancellazione polo-zero nell'origine e che abbiamo la possibilità di fissare due zeri $-1/\mu$ e $-1/\gamma$: ovvero quelli portati dal regolatore PID.

Ponendo i due zeri prossimi a poli a parte reale negativa, ci assicuriamo che indipendentemente dal valore di K_G, i poli saranno sempre nel piano reale sinistro.

$$\mu = \tau_2 \quad \gamma = \tau_3$$

Inoltre rimanendo libero un solo polo a parte reale positiva $p_1 = -1/\tau_1 > 0$, esso tenderà asintoticamente a sinistra e quindi potremo individuare un valore sufficientemente alto di KG per cui il sistema a catena chiusa diventa stabile. Tracciamo quindi il luogo delle radici della funzione di trasferimento P'(s):

$$P'(s) = \frac{K}{(1+\tau_1 s)}$$



Lezione 094

01. Qual è lo scopo della media adattativa?

☐ Nessuna delle altre risposte proposte è corretta

☐ Lo scopo della media adattativa è quello di evitare il problema dell'occupazione di memoria.

■ Per ridurre gli effetti del transitorio di algoritmo si applica una procedura di stima ricorsiva del valore medio basata sulla minimizzazione ad ogni passo dell'errore di stima e questa procedura è chiamata media adattativa.

☐ Lo scopo della media adattativa è quello di risolvere il problema dell'overflow e dell'underflow connessi all'uso di dispositivi di calcolo numerico.

02. Quale problema è possibile risolvere mediante il metodo della media pesata?

☐ La media pesata consente di risolvere il problema dell'overflow e dell'underflow dovuto all'impiego di dispositivi di calcolo numerico.

☐ La media pesata consente di risolvere il problema della perdita di informazioni utili dovuto all'impiego di un passo di acquisizione troppo rado.

■ La media pesata consente di risolvere il problema dell'occupazione di memoria.

☐ Nessuna delle altre risposte proposte è corretta

03. Qual è l'obiettivo del data processing?

☐ Nessuna delle altre risposte proposte è corretta

☐ Distinguere tra segnali di ingresso, segnali di uscita, segnali di controllo e segnali di disturbo.

■ Ripulire da rumori o disturbi il segnale in ingresso al fine di estrarre tutto e solo il segnale utile.

☐ Elaborare i dati con la massima velocità di calcolo possibile.

04. Quale problema è possibile risolvere mediante il metodo della media mobile?

☐ La media mobile è il metodo più semplice e intuitivo per risolvere il problema del rumore di digitalizzazione dovuto all'impiego di un passo di acquisizione troppo fitto.

■ La media mobile è il metodo più semplice e intuitivo per risolvere il problema dell'overflow e dell'underflow dovuto all'impiego di dispositivi di calcolo numerico.

☐ Nessuna delle altre risposte proposte è corretta

☐ La media mobile è il metodo più semplice e intuitivo per risolvere il problema della perdita di informazioni utili dovuto all'impiego di un passo di acquisizione troppo rado.

05. Quali sono gli elementi dello schema funzionale generalmente utilizzato per presentare l'acquisizione dati?

☐ Segnale digitale in ingresso -> dispositivo di elaborazione (data processing) -> convertitore digitale-analogico -> segnale analogico -> filtro passa-basso

☐ Nessuna delle altre risposte proposte è corretta

■ Segnale analogico in ingresso -> filtro passa-basso -> convertitore analogico-digitale -> segnale digitale -> dispositivo di elaborazione (data processing)

☐ Segnale analogico in ingresso -> filtro passa-alto -> convertitore analogico-digitale -> segnale digitale -> dispositivo di elaborazione (data processing)

06. Nel processo di acquisizione dati, quali sono i rischi che si corrono se il passo di acquisizione è troppo fitto o troppo rado?

■ Se è troppo fitto viene esaltato il rumore di digitalizzazione. Se è troppo rado vengono perse le informazioni contenute nel segnale utile.

☐ Se è troppo fitto o troppo rado vengono perse le informazioni contenute nel segnale utile.

☐ Se è troppo fitto vengono perse le informazioni contenute nel segnale utile. Se è troppo rado viene esaltato il rumore di digitalizzazione.

☐ Nessuna delle altre risposte proposte è corretta

07. Descrivere un metodo online ricorsivo di stima del valore medio di un set di campioni.

MEDIA PESATA

Per **risolvere il problema dell'occupazione di memoria** si può stimare la media al passo attuale *j* conoscendo il valore della media stimato al passo precedente (*j*-1).

L'espressione analitica della media pesata al passo *j* risulta:

$$\hat{X}(j) = \hat{X}(j-1) + \alpha\,(x(j) - \hat{X}(j-1))$$

MEDIA PESATA

$1 \le j \le n$ $\quad \hat{X}(0) = X_0$

Il valore di α va fissato sulla base della **varianza dei dati** di cui calcolare la media.

Da α dipendono sia la **durata del transitorio di algoritmo** sia l'inevitabile **dispersione della stima** del valore medio.

Dopo che è **esaurito il transitorio di algoritmo**, la media pesata presenta una **dispersione di ampiezza limitata** con **andamento di tipo periodico**.

La media pesata può essere vista come un **sistema controllato con modalità di controllo a controreazione**.

08. Descrivere la procedura della media adattativa e della media pesata adattativa, con le relative assunzioni.

MEDIA ADATTATIVA

Per **ridurre gli effetti del transitorio di algoritmo** si applica una procedura di stima ricorsiva del valore medio basata sulla **minimizzazione ad ogni passo dell'errore di stima**, chiamata media adattativa..

L'espressione analitica della media adattativa al passo *n* risulta:

$$Q_n = Q_{n-1} + \alpha(x_n^2 - Q_{n-1})$$
$$K(n) = \frac{P_{n-1}}{Q_n + P_{n-1}}$$
$$X_n = X_{n-1} + K(n)\,(x_n - X_{n-1})$$
$$P_n = K(n)\,Q_n$$

Il valore della media calcolato ad ogni passo n è influenzato da un errore di misura e da un errore di stima:

$$x_n = X^* + \varepsilon_n$$
$$\hat{X}(n) = X^* + \theta_n$$

- VALORE MISURATO AL PASSO n
- STIMA DELLA MEDIA AL PASSO n
- MEDIA ESATTA (INCOGNITA)
- ERRORE DI MISURA AL PASSO n
- ERRORE DI STIMA AL PASSO n

Conviene allora ricavare ad ogni passo quel valore che rende **minima la varianza dell'errore di stima**.

Ciò è ottenuto applicando al calcolo ricorsivo della stima del valore medio la metodologia su cui si basa il **filtro di Kalman**.

MEDIA ADATTATIVA - ASSUNZIONI

L'errore di misura e l'errore di stima sono **variabili aleatorie** assimilabili a **rumore bianco a media nulla**, ovvero:

- **non presentano periodicità**;
- **non introducono un errore costante** (bias).

L'errore di misura e l'errore di stima **non sono correlati**, pertanto il **valore atteso del loro prodotto ha valore nullo**.

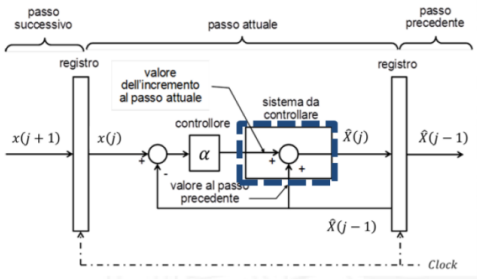
ε_n **ERRORE DI MISURA AL PASSO n**

θ_n **ERRORE DI STIMA AL PASSO n**

09. Illustrare e commentare lo schema di controllo a controreazione per il calcolo della media pesata.

MEDIA PESATA

Il sistema da controllare è caratterizzato da un comportamento dinamico assimilabile a quello di un **integratore**, in cui il valore al passo attuale X(j) è ottenuto come somma del valore relativo al passo precedente X(j-1) e dell'incremento al passo attuale, ossia (x(j)-X(j-1)), moltiplicato per il guadagno α.



10. Descrivere un metodo offline di calcolo del valore medio di un set di campioni.

MEDIA ARITMETICA

Il calcolo della **MEDIA ARTIMETICA** di un insieme di dati è una operazione **a posteriori**, ossia che può venire effettuata solo dopo che sono **disponibili tutti i dati** di cui si vuole calcolare il valore medio;

L'espressione analitica risulta:

$$X(n) = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i$$

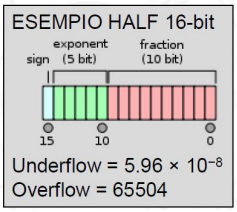
MEDIA ARITMETICA

Se per il calcolo della media aritmetica si usa un **dispositivo di calcolo numerico** bisogna tenere conto della lunghezza di parola finita (8-64 bit);
Il valore della **sommatoria** può assumere valori troppo elevati (**overflow**) per essere rappresentato con la lunghezza di parola del dispositivo di calcolo.
Il valore del **termine 1/n** può assumere valori troppo piccoli (**underflow**) per essere compatibile con la lunghezza di parola.

$$X(n) = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i$$

OVER-FLOW

UNDER-FLOW



11. Cosa significa data processing?

Quando si vuole studiare un qualsiasi segnale proveniente dal mondo reale (ovvero da un sensore) per poter, ad esempio, paragonare ad un segnale derivato da una simulazione, ci si imbatte nel problema di dover «ripulire» i dati in ingresso.

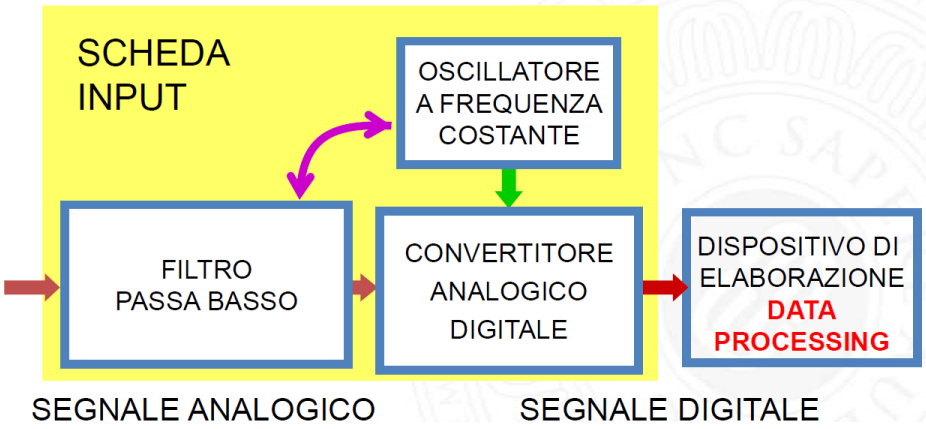
I sensori sono affetti da differenti problemi, che vanno dal malfunzionamento, all'errore di misura che in qualche maniera «sporcano» il segnale utile.

L'obiettivo del data processing è proprio quello di ripulire da rumori o disturbi il segnale in ingresso al fine di estrarre tutto e solo il segnale utile.

12. Illustrare lo schema funzionale della procedura di acquisizione dati.

ACQUISIZIONE DATI

SCHEMA FUNZIONALE



Lezione 095

01. Quale comportamento dovrebbe avere un filtro passa-basso ideale?

- [x] Dovrebbe lasciare inalterate le frequenze entro la banda del segnale utile e attenuare massimamente le frequenze oltre la banda del segnale utile.
- [ ] Nessuna delle altre risposte proposte è corretta
- [ ] Dovrebbe attenuare massimamente tutte le frequenze.
- [ ] Dovrebbe attenuare massimamente le frequenze entro la banda del segnale utile e lasciare inalterate le frequenze oltre la banda del segnale utile.

02. Quale delle seguenti affermazioni è corretta con riferimento ai filtri di Bessel?

- [ ] I filtri di Bessel hanno un buon comportamento passa-alto.
- [ ] I filtri di Bessel hanno un buon comportamento passa-banda.
- [ ] Nessuna delle altre risposte proposte è corretta
- [x] I filtri di Bessel hanno un buon comportamento passa-basso.